

ESCOLA NAVAL

DEPARTAMENTO DE FORMAÇÃO DE ENGENHEIROS
NAVAIS - RAMO MECÂNICA



**Desenvolvimento de um sistema de afundamento controlado
aplicável a navios obsoletos**

Pedro Idris Sabali

Aspirante-a-oficial

MESTRADO EM CIÊNCIAS MILITARES NAVAIS
ENGENHARIA NAVAL - RAMO MECÂNICA

MMXIII

ESCOLA NAVAL

DEPARTAMENTO DE FORMAÇÃO DE ENGENHEIROS
NAVAIS - RAMO MECÂNICA

**Desenvolvimento de um sistema de afundamento controlado aplicável a
navios obsoletos**

O Mestrando,

O Orientador,

Pedro Idris Sabali
Aspirante-a-oficial

José Pita Rodrigues Rentróia
Capitão-de-mar-e-guerra

MESTRADO EM CIÊNCIAS MILITARES NAVAIS
ENGENHARIA NAVAL - RAMO MECÂNICA

MMXII



AGRADECIMENTOS

Finalmente, depois de uma longa fase académica e de algumas pedras ao longo do caminho termina um ciclo, que começa sem dúvida em casa, em casa é construída a nossa virtude, em casa definimos o nosso carácter, em casa somos educados e em casa somos o espelho do empenho dos nossos familiares na nossa formação, portanto, os primeiros destinatários dos meus agradecimentos serão certamente para os elementos da minha família, aos meus pais e às minhas irmãs, com uma atenção especial para o meu pai a quem tudo devo, todo o empenho que sempre demonstrou e a feliz ideia de a determinada altura da minha vida ter-me proposto fazer parte de uma instituição militar à qual dediquei nove anos da minha vida, onde complementei a minha formação como pessoa, baseado em valores que hoje em dia passam para segundo plano como a honra, a verdade, a lealdade, a frontalidade e outros valores mais, que nos definem e nos caracterizam como pessoas, aprendi com os bons exemplos dos mais antigos, com o seu sucesso, académico e profissional, numa instituição onde este efeito é extremamente motivador em alunos mais novos, que almejam ser sempre como os mais velhos e, mais importante, mostram-nos o caminho e como se encontra ao alcance de todos, independentemente da sua origem. Aprendi precocemente a ser responsável, a cumprir horários e a ser exigente comigo e com os outros, saímos mais ricos, como cidadãos úteis à sociedade que se reflete nas amizades que perduram para toda a vida, verdadeiras amizades, não amizades de socialização.

Particularmente na execução da dissertação de mestrado e já no âmbito académico da Escola Naval, obtive conselhos e contribuições muito preciosas, sem as quais não seria possível fazer este trabalho, agradeço ao meu tutor CMG ECN Rodrigues Rentróia por toda a orientação dada e disponibilidade demonstrada ao longo da dissertação; à Direção de Navios, nomeadamente ao CTEN EN-MEC Leal das Neves por ter facultado apoio material determinante para a realização da dissertação, assim como a disponibilidade em ajudar; às pessoas do Departamento de Armas e Eletrónica, que foram incansáveis, especialmente ao CFR EN-AEL Ribeiro Correia, que demonstrou a já reconhecida disponibilidade e capacidade para ajudar e ensinar inesgotáveis; à camara de Oficiais do N.R.P. D. Francisco de Almeida e ao seu Comandante CMG Salvado Figueiredo, navio onde estagiei, pelo interesse demonstrado no âmbito da minha dissertação e contributos fundamentais na realização desta; ao SAJ ETI Gertrudes que simplificou aquilo que por vezes a minha cabeça complicava; à oficina da Escola Naval que sempre que solicitava assistência, não só



forneciam as ferramentas que necessitasse mas também uma enorme disponibilidade em ajudar a melhorar a parte técnica; ao AA, SA, por ter fornecido contributos que melhorassem o meu trabalho.

Finalmente um agradecimento à instituição Marinha Portuguesa, por ter proporcionado experiências inesquecíveis, ao longo destes anos em que fiz parte da Escola Naval, das quais duvidei sempre que algum dia pudesse desfrutar, sítios longínquos que visitei, culturas novas com as quais interagi e a experiência de alto-mar que tanto me atraiu para esta instituição riquíssima de história e tradições, por este motivo e todos os outros. Estou eternamente agradecido.



RESUMO ANALÍTICO

Com a presente dissertação de mestrado pretendo planejar, projetar e conceber um sistema de afundamento controlado de forma automática, que permita a uma determinada plataforma desenvolver o seu afundamento principalmente na horizontal, mas também sendo possível efetuar a um ângulo definido ao critério do utilizador, mediante ajustes nos sensores e na programação. Na parte introdutória da dissertação, abordei a motivação da construção deste sistema, fiz uma pequena mostra da aplicação de navios obsoletos no crescente interesse da área do mergulho recreativo e comparei as vantagens e desvantagens do afundamento tradicional com explosivos em relação ao afundamento controlado.

Na seção do enquadramento teórico, foram abordados conceitos que serviram de base, para o estudo do comportamento da plataforma durante o processo de afundamento, com base em princípios da Arquitetura Naval, nomeadamente, da Estabilidade. Estes fundamentos teóricos permitiram avaliar com exatidão e fundamentação matemática, o modo como se comporta a plataforma ao afundar e, com base nesses princípios, foi possível fazer ajustes, correções e previsões de comportamento. Apesar de ter abordado o tema da estabilidade em avaria, todos os cálculos efetuados foram baseados em conceitos da Estabilidade Intacta, que baseia-se na manutenção estrutural do casco, durante todo o processo, que ao contrário dos conceitos da Estabilidade em Avaria, o casco sofre uma ou varias roturas.

Na secção da metodologia, aqui uma área de trabalho mais pessoal e prática, pude com base em gráficos de carenas direitas, prever o modo de comportamento de uma corveta da classe “Batista de Andrade”. Foi possível modelar e construir um sistema, de modo a aferir o seu comportamento, garantindo que o afundamento tinha um desenvolvimento na horizontal. Com a realização de eventuais correções, que se concentraram mais no posicionamento dos sensores, de modo a não permitir que o modelo inclinasse demasiado.

Depois de efetuadas a provas no tanque e calibrado o sistema conclui que o sistema funcionava como pretendido inicialmente. Garanti um afundamento horizontal e a possibilidade em efetuar a paragem do processo, permanecendo o modelo na posição de flutuação quando as válvulas eram fechadas, como irei demonstrar ao longo da dissertação.

Palavras-chave: mergulho, afundamento, automação, estabilidade, estanqueidade, metacentro.



ABSTRACT

With the present master dissertation, I pretend to plan, project and conceive a system of sinking controlled automatically, that allows to a given platform, develop his sinking mainly in the horizontal, but also being possible to perform by a selection of an angle defined by the user and adjusting the sensors and the programming. In the introductory part of the dissertation, I addressed the motivation in building of this system made; a small approach of the application of obsolete ships, in the increasing interest of the area of the recreational diving, and compared the advantages and disadvantages of the traditional sinking, with application of explosives in relation to the controlled sinking. In the section of the theoretical framework, were addressed concepts that served, as the basis on the study of the behaviour of the platform during the process of sinking, based on principles of the Naval Architecture, namely, the Stability. These theoretical foundations, allowed evaluating with accuracy and on mathematical basis, the way as the platform behaves when sinking, based on these principles. It was possible to make adjustments, corrections and forecasts of the behaviour. In spite, of having addressed the subject insert in damage stability, all the computation made were based in concepts of the Intact Stability, without that the integrity of the hull during all the process had been affected, like the concepts of damage stability makes reference. In the section of the methodology, here an area of work more personal and practical, I could base on hydrostatic charts curves to foresee the way of behaviour of a Portuguese corvette of the class “Batista of Andrade”. It was possible to mould and build a system, in order to assess the behaviour of opening and closing valves. Guarantee that the sinking developed in the horizontal, and perform eventual corrections, that I verified that’s concentrate’s more in the adjustment of the sensors, in a way to not allowing that the model heel too much, assuring always the smallest angle of inclination possible. After I made the proof tests in the tank and calibrated the system, I conclude that the system worked as pretended initially, ensuring an horizontal sinking, and was possible to make the stoppage of the process, remaining the model in the position of flotation when the valves were closed, as I will go to show along of the dissertation.

Key words: diving, sinking, automation, stability, tightness, metacenter.



ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	III
RESUMO ANALÍTICO	V
ABSTRACT	VI
ÍNDICE GERAL	VII
LISTA DE ACRÓNIMOS	XI
LISTA DE FIGURAS	XIII
LISTA DE SÍMBOLOS	1
LISTA DE TABELAS	2
ENQUADRAMENTO TEÓRICO	3
1. INTRODUÇÃO	4
1.1. Pertinência do tema	4
1.2. Objetivo de estudo.....	6
1.3. Problemas e questões da investigação.....	7
2. PRINCIPIOS DE FLUTUABILIDADE	8
2.1. Forças hidrostáticas em superfícies.....	9
2.2. Força de impulsão	10
3. ESTABILIDADE INTACTA	12
3.1. Princípios elementares	12
3.2. O equilíbrio estático	13
3.2. Deslocamento e centro de impulsão	15



3.3.	O metacentro	17
3.4.	Estabilidade Inicial	19
3.5.	Estabilidade Transversal	20
3.6.	Estabilidade Longitudinal	21
4.	ESTABILIDADE EM AVARIA	24
4.1.	Efeitos gerais da inundação por avaria	24
4.2.	Compartimentação	27
4.3.	Efeito dos espelhos líquidos	28
4.4.	Inundação controlada	31
	METODOLOGIA	34
5.	APLICABILIDADE: CORVETA PORTUGUESA (COM DADOS BASEADOS NA CLASSE BATISTA DE ANDRADE)	35
5.1.	Motivação e fundamentos	35
5.1.1.	Diferenças entre os métodos da adição de peso e da perda de flutuabilidade	35
5.2.	Comportamento transversal durante o processo	36
5.2.1.	Comparativo de estabilidade entre um submarino e um navio de superfície	37
5.2.2.	Comportamento de G, B e M durante o embarque de água	38
5.2.3.	A evolução da estabilidade	40
5.3.	Comportamento longitudinal	41
5.4.	Ponto crítico no processo de afundamento	42
5.4.1.	Comportamento da impulsão e força gravítica	43
6.	MODELO EXPERIMENTAL	45



6.1.	Objetivos	45
6.1.1.	Dimensões, compartimentação e características materiais do batelão	46
6.1.2.	Sistema de aplicação para afundamento real	47
6.2.	Constituição do sistema	49
6.3.	Automação e controlo	52
6.3.1.	Autómato programável	52
6.3.2.	Montagem e cablagem do autómato	54
6.4.	Programação	56
6.4.1.	FBD (<i>Function Block Diagram</i>)	56
6.4.2.	Acionamento e paragem	61
6.4.3.	Operação do sistema	62
6.5.	Avaliação económica da aplicação do sistema	63
7.	PROVAS NO TANQUE	66
7.2.	Objetivo	66
7.3.	Tipos de provas e execução	67
7.4.	Dados obtidos	72
7.5.	Análise parcial de resultados	79
8.	ANÁLISE GLOBAL, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	81
	BIBLIOGRAFIA	84
	ANEXO A	86
	ANEXO B	87
	ANEXO C (PROCESSO DE CONSTRUÇÃO DO MODELO)	97



Batelão.....	98
Passagem de cabos elétricos e impermeabilização de componentes	102
Cablagem de componentes ao autómato	106
Fixação estrutural dos componentes.....	109



LISTA DE ACRÓNIMOS

USS – *United States Ship.*

NRP – *Navio da República Portuguesa.*

CARC – *Canadian Artificial Reef Consulting*

SI – *Sistema Internacional*

SNAME – *The Society of Naval Architects and Marine Engineers*

SOLAS – *Safety of Life at Sea*

CPU – *Central processing Unit*

STL – *Statement List*

FBD – *Function Block Diagram*

LAD – *Ladder Diagram*

AA,SA – *Arsenal do Alfeite, Sociedade Anónima*

EN – *Escola Naval*

CAD – *Computer Aided Design*

AM (radio) – *Amplitude Modulation*

BSP – *British Standard Pipe*

AR – *A Ré*



AV – A vante

BB – Bombordo

EB – Estibordo

OSPAR – Oslo/Paris convention (para a proteção do meio marinho do Atlântico Nordeste)

TRG – Trigger (denominação informática para arranque ou acionamento)



LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – ATUAÇÃO DAS FORÇAS HIDROSTÁTICAS EM SUPERFÍCIE CURVA, (ÇENGEL & CIMBALA, 2007).....	9
FIGURA 2 - ATUAÇÃO DAS FORÇAS HIDROSTÁTICAS EM SUPERFÍCIE PLANA, (ÇENGEL & CIMBALA, 2007).....	9
FIGURA 3- IMPULSÃO (MACHADO, 2012).....	10
FIGURA 4 - FLUTUABILIDADE, (I) REPRESENTA A FORÇA DE IMPULSÃO (CARVALHO, 2012)	11
FIGURA 5 - EQUILÍBRIO ESTÁTICO (FARIAS, 2012).	13
FIGURA 6 – EQUILÍBRIO ESTÁVEL (GILLMER, 1972)	14
FIGURA 7 – EQUILÍBRIO NEUTRO (GILLMER, 1972)	14
FIGURA 8 – EQUILÍBRIO INSTÁVEL (GILLMER, 1972)	14
FIGURA 9 - METACENTRO (GILLMER, 1972).....	15
FIGURA 10 – INTERAÇÃO DAS FORÇAS GRAVÍTICA E DE IMPULSÃO (SNAME, 1988).....	16
FIGURA 11 – BRAÇO DO MOMENTO ENDIREITANTE (GZ) (SNAME, 1988).....	18
FIGURA 12 – ALTURA METACÊNTRICA TRANSVERSAL (THE SNAME, 1939)	19
FIGURA 13 – ATUAÇÃO DAS FORÇAS DE IMPULSÃO E GRAVÍTICA NA ESTABILIDADE (THE SNAME, 1939)	21
FIGURA 14 – METACENTRO LONGITUDINAL (THE SNAME, 1939).....	22
FIGURA 15 – EFEITO DOS ESPELHOS LÍQUIDOS (RAWSON & TUPPER, 2001).....	29
FIGURA 16 – SUBIDA DO GZ DEVIDO AO EFEITO DOS ESPELHOS LÍQUIDOS (GILLMER, 1972)	29
FIGURA 17 – EXEMPLO DE UM DIAGRAMA DE ESTABILIDADE DE UM NAVIO. (SNAME, 1988)	32



FIGURA 18 - MOVIMENTAÇÃO DE B,G E M.....	39
FIGURA 19 – EFEITO LONGITUDINAL (GILLMER, 1972)	41
FIGURA 20 - ESQUEMA ELÉTRICO DO MODELO (ELABORADO PELO AUTOR EM SOFTWARE QELETROTECH)	48
FIGURA 21 – ESQUEMA ELETROPNEUMÁTICO APLICADO A UM CASO REAL (ELABORADO PELO AUTOR EM SOFTWARE QELETROTECH)	48
FIGURA 22 – FUNCIONAMENTO DO SENSOR DE INCLINAÇÃO.....	50
FIGURA 23- -ELETROVÁLVULA DE 12V DO MODELO EXPERIMENTAL	51
FIGURA 24 – -INTERRUPTOR DE PARAGEM E ARRANQUE DO PROCESSO.....	57
FIGURA 25 – TEMPORIZADOR DE LIGAÇÃO DE CINCO SEGUNDOS	58
FIGURA 26 – GRUPO DE SENSORES DE LEITURA DO MOVIMENTO	59
FIGURA 27 – GRUPO DAS FUNÇÕES LÓGICAS	59
FIGURA 28 – ESQUEMÁTICO DAS ELETROVÁLVULAS NAS SAÍDAS	60
FIGURA 29 – PROGRAMAÇÃO DE INÍCIO/PARAGEM DE PROGRAMA (EM AMBIENTE DE PROGRAMAÇÃO LOGO! SOFTWARE).....	61
FIGURA 30 – INTERRUPTOR LIGADO, INÍCIO DA CONTAGEM (EM AMBIENTE DE PROGRAMAÇÃO LOGO! SOFTWARE)	61
FIGURA 31 – ACIONAMENTO DEPOIS DA CONTAGEM TERMINADA (EM AMBIENTE DE PROGRAMAÇÃO LOGO! SOFTWARE).....	62
FIGURA 32 – TANQUE DE TESTES DA EN	66
FIGURA 33 – CONDIÇÃO INICIAL: DESEQUILÍBRIO AR	67
FIGURA 34 - CONDIÇÃO INICIAL: DESEQUILÍBRIO AR (TOPO)	67
FIGURA 35 - CONDIÇÃO INICIAL: DESEQUILÍBRIO AV	68
FIGURA 36 - CONDIÇÃO INICIAL: DESEQUILÍBRIO AV (TOPO)	68
FIGURA 37 - CONDIÇÃO INICIAL: DESEQUILÍBRIO A BB	69



FIGURA 38 - CONDIÇÃO INICIAL: DESEQUILÍBRIO A BB (TOPO)	69
FIGURA 39 - CONDIÇÃO INICIAL: DESEQUILÍBRIO A EB	70
FIGURA 40 - CONDIÇÃO INICIAL: DESEQUILÍBRIO A EB (TOPO).....	70
FIGURA 41 - CONDIÇÃO INICIAL: DESEQUILÍBRIO COMBINADO AV+BB	71
FIGURA 42 - CONDIÇÃO INICIAL: DESEQUILÍBRIO COMBINADO AV+BB (TOPO)	71
FIGURA 43 - CONDIÇÃO INICIAL: DESEQUILÍBRIO COMBINADO AR+EB	72
FIGURA 44 - CONDIÇÃO INICIAL: DESEQUILÍBRIO COMBINADO AR+EB (TOPO).....	72
FIGURA 45 – PÊNDULO COLOCADO PARA A EXECUÇÃO DA LEITURA DE ÂNGULOS	73
FIGURA 46 – PONTOS DE COLOCAÇÃO DO PESO: 1) 6 CM; 2) 12 CM; 3) 18 CM	74



LISTA DE SÍMBOLOS

ρ – *Densidade*

γ – *Peso específico*

v – *Volume específico*

V – *Volume*

B – *Centro de impulsão ou centro de carena*

M – *Metacentro*

G – *Centro de gravidade do navio*

WL – *Linha de água (water line)*

\overline{GZ} – *Braço endireitante*

$\delta\varphi$ – *Variação do ângulo infinitesimal de inclinação*

\overline{GM} – *Altura metacêntrica*

KB – *Altura do centro de impulsão*

BM – *Raio metacêntrico*

Ψ – *Pequeno ângulo de inclinação*

Δ – *Deslocamento*

∇ – *Volume deslocado*

I – *Impulsão*

w – *massa de teste na experiência de inclinação*

\bar{y} – *Distância transversal da massa de teste*



LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PROPRIEDADES DE ALGUNS MATERIAIS, COMPILADO PELO AUTOR COM BASE EM (RAWSON & TUPPER, 2001)	8
TABELA 2 – INFLUÊNCIA NA INUNDAÇÃO DE COMPARTIMENTOS. COMPILADO PELO AUTOR, E ILUSTRAÇÕES COM BASE EM (SNAME, 1988)	33
TABELA 3 PRINCIPAIS FUNÇÕES LÓGICAS, COMPILADO PELO AUTOR COM BASE EM MANUAL SIEMENS LOGO!	57
TABELA 4 – MASSAS TOTAIS NO BATELÃO	74
TABELA 5 – LEITURAS OBTIDAS A PARTIR DO PÊNDULO	74
TABELA 6 – TABELA RESUMO DOS DADOS PARA O CÁLCULO FINAL.....	74
TABELA 7 – TABELA DE MOMENTOS E TANGENTES PARA CONSTRUÇÃO DE GRÁFICO.....	75
TABELA 8 - CÁLCULOS DAS MÉDIAS RESULTANTES DA ALTURA METACÊNTRICA E RESULTADO FINAL.....	76
TABELA 9 – POSIÇÃO DO CENTRO DE GRAVIDADE DE CADA CHAPA QUE CONSTITUI O BATELÃO	77
TABELA 10 – MASSAS ADICIONADAS AO BATELÃO.....	78
TABELA 11 – RESUMO DOS PONTOS DE REFERÊNCIA DO BATELÃO.....	78



ENQUADRAMENTO TEÓRICO



1. INTRODUÇÃO

1.1. Pertinência do tema

Portugal é um país com um grande território marítimo, existindo atualmente uma estratégia e necessidade de abertura da economia ao mar. Neste contexto, a área de recreio surge repentinamente, com perspectivas económicas locais crescentes. Uma das vertentes deste interesse é o mergulho recreativo em recifes artificiais¹, criados com recurso ao afundamento de navios obsoletos. É precisamente inserida nesta área temática que pretendo incidir a minha dissertação, especialmente a parte que envolve o processo do afundamento.

O mergulho recreativo em estruturas afundadas, mais concretamente em navios, é uma atividade com uma grande procura a nível mundial, tratando-se do tipo de mergulho mais procurado pela maioria dos praticantes da atividade. Este surgimento tem sido impulsionado pelos mergulhadores frequentes e tem levado a um maior investimento na exploração dos recifes artificiais. O afundamento dos navios com este propósito tornou-se assim o processo mais comum na criação destes parques subaquáticos, constituindo uma boa solução para os navios que durante anos serviram os interesses pessoais ou estaduais.

A preparação de um navio para o afundamento envolvendo, por exemplo, a remoção de resíduos tóxicos, tintas, vernizes, e estruturas que possam constituir perigo para os mergulhadores, etc., é assegurada por entidades com valências técnicas para o efeito, respeitando determinadas normas ambientais para que o navio possa ser colocado no fundo do mar, sem prejuízo para a fauna e flora.

Existem alguns bons exemplos de recifes artificiais, que se tornaram hoje locais de mergulho reconhecidos e visitados por mergulhadores de todo o mundo, como por exemplo, o naufrágio do “*Rainbow Warrior*”². Ocorrido na Nova Zelândia, ou no caso mais recente do porta-aviões *USS “Oriskani”*, que jaz na Flórida, este último constituindo uma operação dispendiosa com o intuito de criar o maior recife artificial vocacionado para o mergulho a nível mundial.

Em Portugal, podemos também encontrar iniciativas de afundamentos intencionais de navios para servir de exploração ao mergulho recreativo. Na ilha de Porto Santo, no

¹ Designação para estruturas criadas pelo homem, colocadas no fundo do mar e que posteriormente resultam na criação de recifes nas suas estruturas.

² Navio emblemático pertencente á organização ambiental *Greenpeace*.



arquipélago da Madeira, foi afundado intencionalmente um navio que servia de ligação entre as ilhas da Madeira e Porto Santo chamado “*Madeirense*”. A intenção deste projeto foi criar um local de turismo subaquático que consequentemente trouxe riqueza e biodiversidade marinha, tornando-se numa referência a nível nacional e europeu no mergulho em naufrágios, permitindo uma contribuição económica local, (SÁ, 2010). Contudo, na generalidade dos casos, terão sido os infortúnios do passado os maiores responsáveis pela criação de locais de mergulho, atualmente possibilitando a visita de mergulhadores. Situado praticamente no meio do oceano atlântico norte encontra-se o arquipélago dos Açores que representa há mais de cinco séculos um importante ponto de apoio á navegação atlântica. Como resultado da importância deste arquipélago, são os cerca de seiscentos naufrágios registados nas águas em redor das nove ilhas, em que apenas uma pequena percentagem destes locais se encontram identificados e em profundidades acessíveis que permitam a sua exploração e mergulho recreativo.

O navio naufragado no arquipélago dos Açores mais visitado e com melhor localização é o navio “*Dori*³”. Encontra-se localizado a uma pequena distância do porto de Ponta Delgada, na ilha de São Miguel, numa das zonas mais abrigadas da costa sul da ilha e estabelecida em profundidade ideal de mergulho. Jaz aí desde mil novecentos e sessenta e quatro. Quase meio século depois, o local encontra-se repleto de espécies marinhas que encontraram abrigo nas chapas de metal, tubagens e grandes compartimentos intactos ao longo do navio de cento e trinta metros de comprimento, (SÁ, 2010).

A Marinha Portuguesa é parceira de um projeto similar, colaborando no âmbito do afundamento de navios obsoletos da própria esquadra. Nomeado como projeto “*Ocean Revival*⁴”, foram cedidos um conjunto de quatro navios ao município de Portimão cujo afundamento dará origem a um parque subaquático. Fazem parte: a corveta “*N.R.P. Oliveira e Carmo*”, a fragata “*N.R.P. Comandante Hermenegildo Capelo*”, o navio patrulha “*N.R.P. Zambeze*” e finalmente o navio oceanográfico “*N.R.P. Almeida Carvalho*”, todos estes navios obsoletos, (Ocean Revival, 2012).

A responsabilidade do afundamento está entregue á empresa canadiana C.A.R.C., que soma uma lista de mais de duas dezenas de afundamentos realizados por todo o mundo. Ora, é precisamente neste campo específico que incide o trabalho de investigação. O método de afundar com recurso a explosões é um método que não nos permite controlar o afundamento ou parar o processo, no caso de algo não correr conforme planeado, ou seja,

³ Navio mercante Nigeriano construído durante a segunda Grande Guerra nos Estados Unidos da América.

⁴ Projeto de criação de um parque subaquático em Portimão, Algarve.



este consiste em utilizar cargas explosivas que abrem rasgos no casco do navio e levará à consequente entrada de água, a horizontalidade do afundamento é obtido sincronizando o tempo das explosões. Com a presente dissertação, pretendo controlar o afundamento por meio de uma automatização, que também me possibilita fazer a paragem do processo, retomando-o no ponto onde foi suspenso.

1.2. Objetivo de estudo

Com este trabalho, pretendo construir um sistema automatizado que execute o processo de afundamento de uma plataforma, de modo a garantir que, no decorrer do processo de afundamento, tenha um desenvolvimento controlado e uma análise em tempo real do comportamento da plataforma.

Como objetivos fundamentais, proponho-me a:

- a) Desenvolver um sistema que simula o acionamento à distância, que permita a execução de um afundamento controlado e automatizado de uma plataforma flutuante;
- b) Fazer um estudo para uma possível aplicação real com um sistema de afundamento equivalente;
- c) Testar um modelo no tanque do laboratório de arquitetura naval, efetuando a medição, recolha e análise dos dados obtidos (dados dinâmicos e estáticos);
- d) Estabelecer conclusões acerca da aplicabilidade do sistema a navios de dimensão real e outras plataformas flutuantes.



1.3. Problemas e questões da investigação

O conceito de usar uma plataforma como recife artificial não é novo. Cada vez mais, são criados pelo mundo inteiro como solução ecológica para os navios obsoletos. É notório que nas proximidades da plataforma afundada nascem novas plantas, surgem seres invertebrados, colonizando a área, os peixes irão migrar para o local e reproduzir-se-ão. A vertente económica da atividade de mergulho recreativo ligada a esta plataforma irá impulsionar a economia local, sendo por vezes este o fator motivacional, tornando todo o projeto bastante atrativo do ponto de vista económico. Enquanto estas iniciativas crescem por serem uma vantagem económica, na rentabilização de uma estrutura obsoleta, alguns cientistas e organizações ambientais, estão preocupados que interesses comerciais de pesca, mergulho e eliminação de resíduos se sobreponham às questões ambientais neste caso, o crescimento abrupto deste tipo de solução para as estruturas pode levar à criação de um ferro velho subaquático, sem que as pessoas se apercebam diretamente das consequências que daí advém. Todos nós ficamos maravilhados com o facto de se lançar um objeto para o fundo do mar e subitamente em seu redor aparecer todo um ecossistema. Animais marinhos migram para este local e na própria estrutura cresce uma flora que serve de subsistência para a fauna local, o que não deixa de ser verdade, mas pode trazer outras consequências malignas que preocupam os grupos ambientais.

A maioria dos ambientalistas classifica a visão como superficial e imediata, que a longo prazo ainda não estão clarificadas as vantagens deste processo, sob o risco de massificar a nível global o processo, colocando o mar em risco, com a criação de um local de despejo de resíduos.

Estou ciente da polémica ambiental envolta no tema, com o debate atual dos prós e contras, mas no âmbito da minha dissertação vou desenvolver a parte técnica do afundamento em si, abstendo-me de qualquer juízo ambiental relativo a este assunto.

2. PRINCIPIOS DE FLUTUABILIDADE

Um fluido apresenta determinadas características, onde posso definir alguns deles como os mais relevantes. A densidade (ρ) é a massa de fluido por unidade de volume, que também pode ser designada como massa volúmica ou massa volumétrica, sendo a sua unidade o Kg/m^3 no S.I. O peso específico (γ) de um fluido é peso por unidade de volume. A sua unidade é o N/m^3 no S.I. O volume específico (v) de um fluido é o inverso da massa volúmica. Tem a função de normalizar o volume de um corpo em relação à sua massa, (RAWSON & TUPPER, 2001).

Estas propriedades são dependentes das condições ambientais, encontram-se sempre associadas a uma determinada temperatura e pressão. As suas propriedades variam consoante variam estas condições. Para uma coerência dos dados padronizou-se: uma atmosfera⁵ para a pressão, e quinze graus celsius para a temperatura, que no caso da água por vezes é utilizado quatro graus celsius, que corresponde à temperatura em que a densidade da água é máxima. Na tabela seguinte posso demonstrar uma comparação entre os diferentes fluidos e suas propriedades. A constante de aceleração da gravidade é $g = 9,807 \text{ m/s}^2$, (RAWSON & TUPPER, 2001).

Material	Densidade (ρ - Kg/m^3)	Vol. Específico (v - m^3/mg)	Peso específico (γ - N/m^3)
Água doce	1000	1	9807
Água salgada	1025	0,975	10052,175
Fuelóleo	947	1,05	9287,229
<i>Diesel</i>	841	1,19	8247,687
Petróleo	697	1,44	6835,479
Aço	7689	0,13	75406,023
Mogno	849	1,18	8326,143
Ar	1,293	774,775	12680,451

Tabela 1 - Propriedades de alguns materiais, compilado pelo autor com base em (RAWSON & TUPPER, 2001)

⁵ 1 Atm = 10^5 Pa = 1 Bar, estas equivalências correspondem à pressão atmosférica

2.1. Forças hidrostáticas em superfícies

Uma placa que esteja imersa num fluido, tal como a parede de um tanque que o contenha; a comporta de uma barragem ou o casco de um navio em repouso, estão sujeitos a determinadas forças de pressão exercidas pelo fluido, distribuídas pela superfície de contacto. Estas forças tornam-se diferentes mediante a variação da forma das superfícies, sejam elas planas ou curvas. Na superfície plana, as forças hidrostáticas formam um sistema de forças paralelas entre si, que atuam com uma determinada intensidade e localização, localização esta que, por questões de simplificação de cálculos, é denominada como centro de pressão. Traduz-se numa determinada força que atua nessa posição com uma intensidade equivalente, substituindo as forças que na realidade encontram-se planarmente distribuídas, esta força única que substitui o conjunto de forças é denominada de resultante das forças. Para uma superfície curva submersa, a determinação da força hidrostática resultante é mais complicada, pelo facto de uma força ter uma direção perpendicular à superfície onde está aplicada, ao longo da curvatura esta componente normal variará ao longo da superfície. A forma mais fácil de determinar a resultante das forças neste caso é determinar as componentes horizontais e verticais separadamente.

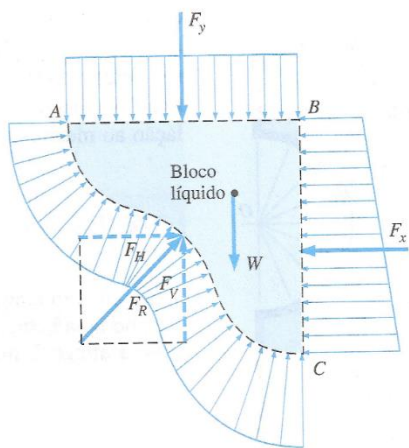


Figura 1 – Atuação das forças hidrostáticas em superfície curva, (ÇENGEL & CIMBALA, 2007)

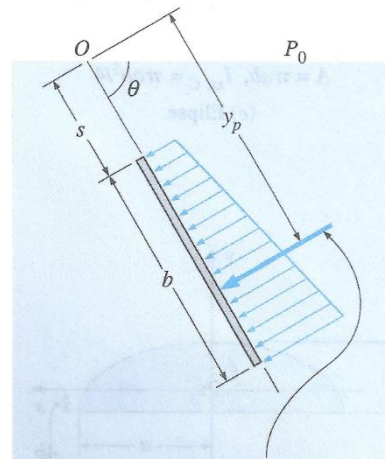


Figura 2 - Atuação das forças hidrostáticas em superfície plana, (ÇENGEL & CIMBALA, 2007)

2.2. Força de impulsão

Todos nós já experimentámos inconscientemente o conceito de impulsão. Sentimos o efeito da impulsão quando mergulhamos corpos sólidos num fluido, que irão transmitir a sensação de serem mais leves no seu interior do que fora deste, do mesmo modo que os corpos que possuam uma densidade inferior ao fluido em que estão mergulhados flutuam, como o caso da madeira na água.

Esta sensação é resultante de uma força vertical exercida na parte submersa do próprio corpo, chamada de força de impulsão.

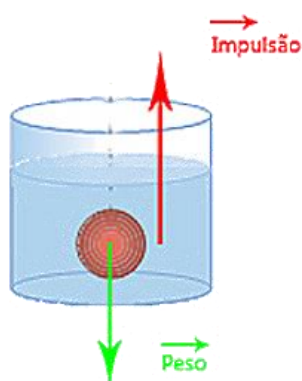


Figura 3- Impulsão (MACHADO, 2012).

O estudo sobre esta força conduz-nos até ao princípio de Arquimedes⁶, em que nos diz que todo o corpo mergulhado total ou parcialmente num fluido recebe da parte deste uma impulsão vertical, de baixo para cima, de intensidade igual à do peso do volume do fluido deslocado pelo corpo (ÇENGEL & CIMBALA, 2007). Ora, para obtermos um corpo que flutue, a intensidade da sua força gravítica (peso) será necessariamente igual à intensidade da força de impulsão. Posso, também, afirmar o mesmo em relação às densidades do corpo e do fluido como ilustra a imagem seguinte.

⁶ Matemático grego (287 – 212 a.C.)

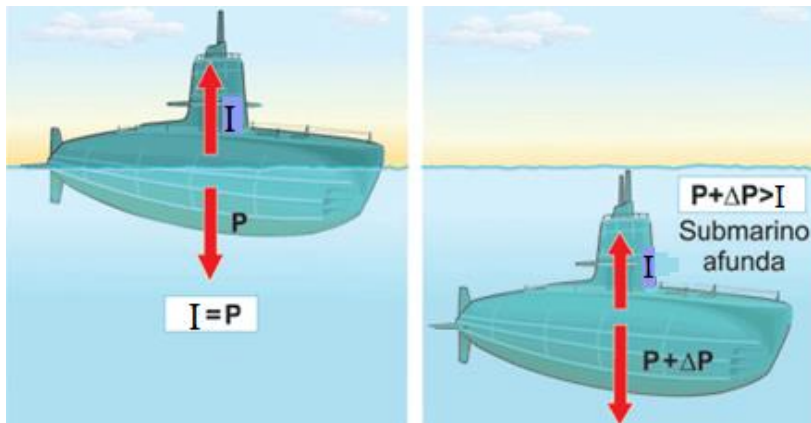


Figura 4 - Flutuabilidade, (I) representa a força de impulsão (CARVALHO, 2012)

Esta força é tanto mais intensa quanto maior for a densidade do fluido ou o volume do corpo, como demonstra a expressão:

$$I = \rho_{\text{fluido}} \times \nabla \times g$$

É por este motivo que corpos volumosos, como navios feitos de metal, muito mais densos que a água, possuem um enorme volume imerso como mostra a expressão algébrica:

$$\begin{aligned} I = F &\leftrightarrow \rho_{\text{fluido}} \times \nabla \times g = \text{massa do navio} \times g \leftrightarrow \\ &\leftrightarrow \text{massa do navio} = \rho_{\text{fluido}} \times \nabla \end{aligned}$$

Como posso mostrar, quando temos um navio construído com material mais denso que a água, para que se verifique a igualdade, o volume deslocado é necessariamente elevado para que o navio flutue.



3. ESTABILIDADE INTACTA

3.1. Princípios elementares

Um navio é um meio de transporte bastante particular e de construção criteriosa. A única altura em que é possível afirmar que um navio está estacionário, numa posição direita, é quando se encontra em doca seca. Uma vez no meio aquático é permanentemente sujeito a forças, podendo ser estas internas ou externas, sendo estas por consequência da agitação marítima, movimentações internas de pesos, espelhos líquidos, vento, etc. Os navios são as únicas plataformas que se encontram neste interface de influência ambiental. Um veículo terrestre, por exemplo, é influenciado pelo ar e pelo atrito, mas a superfície onde assenta encontra-se fixa. Uma aeronave intervém dinamicamente com o ar. Com base na comparação anterior, um navio é um caso peculiar. A zona emersa está sujeita a determinadas condições de vento e a zona imersa está sob a influência das movimentações marítimas considerando esta especificidade, a abordagem carece de designação própria, tais como: metacentro, centro de impulsão, entre outras, como será abordado ao longo da dissertação.

A designação de estabilidade intacta é a capacidade de um navio manter determinadas condições de estabilidade, quando a sua estrutura está, como o próprio nome identifica, intacta, sem avarias ou danos ocorridos. Com esta base, um navio estável pode ser definido como uma característica de funcionamento, traduzida na tendência ou capacidade de retornar à sua posição original, quando uma força externa é aplicada e retirada. Estando em repouso, um navio encontra-se em equilíbrio, quando a componente do peso atua na mesma vertical e para baixo com intensidade igual à impulsão, que atua na mesma vertical mas para cima. Este eixo vertical imaginário de atuação de forças passa pelo centro de gravidade. (ÇENGEL & CIMBALA, 2007)

Existem definições e expressões matemáticas que traduzem-nos algebricamente a condição de estabilidade ou instabilidade. Com base nestes pressupostos basilares, posso fazer a avaliação da estabilidade, que procedo na área da metodologia.

3.2. O equilíbrio estático

Para que possamos apelidar de navio a uma plataforma flutuante, não basta que ela flutue. Para além da propulsão e do governo, outra característica igualmente importante é a manutenção de uma estabilidade positiva, mantendo-se nesta condição dinâmica ou estaticamente.

As forças presentes na estática de um navio são baseadas em princípios básicos da física e da mecânica, sendo caracterizadas por vetores. Então o que é o equilíbrio estático de um navio? É a caracterização de um corpo em repouso, em relação a determinada geometria, que vai corresponder a comportamentos variados (GILLMER, 1972). A distinção no tipo de equilíbrio vai ser baseada essencialmente na sua forma e na resposta a um estímulo externo. No equilíbrio de um corpo em flutuação, temos presentes três situações: equilíbrio estável, instável ou neutro. O equilíbrio estável acontece quando um corpo é influenciado por uma força externa, é retirado da sua posição de repouso, posteriormente, quando essa força deixa de atuar, o corpo volta à sua posição inicial que é a de maior estabilidade. Trata-se da situação mais desejável no caso de um navio padrão. O equilíbrio instável acontece quando um corpo, depois de retirada a influência da força externa, não voltar para a sua posição inicial ou seja, continua a mover-se na direção da influência dessa força, até encontrar uma posição de estabilidade. O equilíbrio neutro acontece quando um corpo se encontra em estabilidade para qualquer posição que adquira, é o caso por exemplo, de um cilindro homogêneo a flutuar num fluido. Por mais que apliquemos um movimento, o cilindro vai girar, sendo estável para qualquer posição.

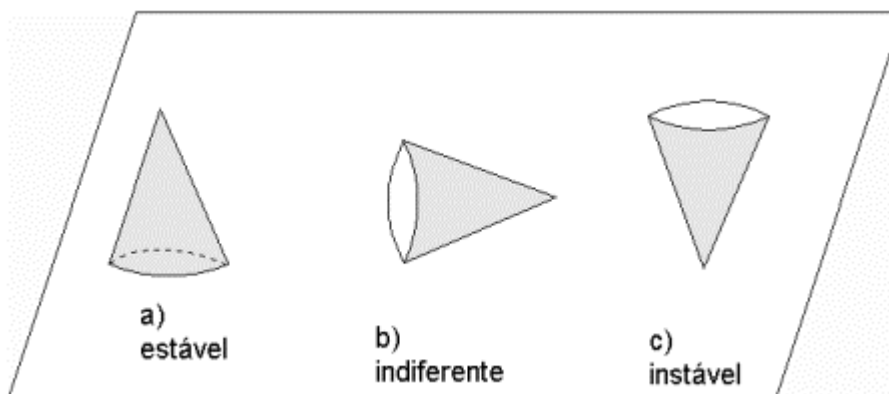


Figura 5 - Equilíbrio estático (FARIAS, 2012).

As forças responsáveis em manter um navio a flutuar, em águas paradas, são a força de impulsão e a força gravítica, como anteriormente referido. A forma imersa de um navio

com formas regulares varia com a inclinação. Consequentemente, o centro de impulsão (B) também irá desviar-se. Esta separação, que ocorre entre as linhas de ação de duas forças exatamente iguais e que atuam em direções opostas, forma um par cuja magnitude é igual ao produto de uma destas forças pela distância que as separa. O resultado deste produto é um momento responsável pela tendência em mover o navio para a posição direita, é chamado de momento endireitante, como ilustrado na figura seis. Na figura sete o navio encontra-se num equilíbrio neutro, qualquer alteração na inclinação do navio irá alterar sempre a posição de equilíbrio, como no caso de um cilindro na água, anteriormente referido. A explicação teórica para este caso reside na coincidência da posição do centro de gravidade (G) com a posição do metacentro (M). Na figura oito, o navio está em equilíbrio instável, caso em que o momento resultante desta combinação de forças, não atua de modo a restaurar o navio na posição direita. Pelo contrário, vai contribuir para que o navio se incline mais. Isto acontece quando o momento endireitante é negativo, o navio tenderá a soçobrar⁷. O centro de gravidade, para a condição de instabilidade, encontra-se numa posição mais elevada que o metacentro.

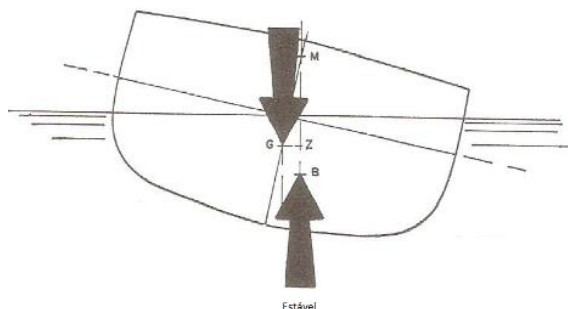


Figura 6 – Equilíbrio estável (GILLMER, 1972)

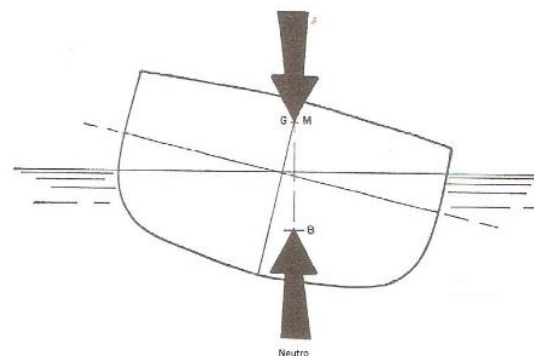


Figura 7 – Equilíbrio neutro (GILLMER, 1972)

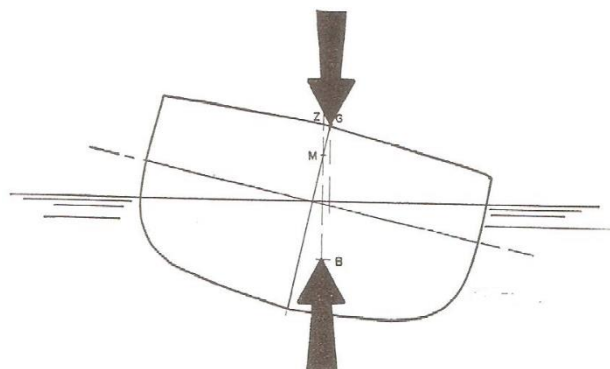


Figura 8 – Equilíbrio Instável (GILLMER, 1972)

⁷ Viragem do navio para a posição oposta à posição direita, equivalente ao capotamento em veículos terrestres

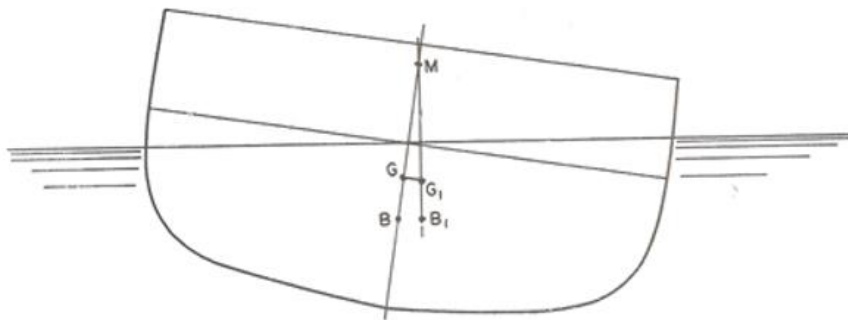


Figura 9 - Metacentro (GILLMER, 1972)

A explicação teórica detalhada sobre o metacentro está presente no capítulo 3.3.

3.2. Deslocamento e centro de impulsão

A unidade de deslocamento é denominada tonelada, mas a origem desta palavra é um pouco incerta. É uma palavra, como tantas outras, que teve uma evolução consoante a necessidade. A palavra tonelada inicialmente definia uma medida de capacidade, só mais tarde passou a ser definida como unidade de massa. A palavra deriva de várias hipóteses de origem. Poderá ser do latim “tunna”, que significa barril, ou “tina” também do latim, que significa navio de transporte de vinho, com origem do inglês medieval “tun” que significa um barril, ou do francês “tonneau”, um barril de vinho de uma medida tal que, quando está cheio, pode ser transportado numa carroça puxada por dois cavalos. (THE SNAME, 1939).

Inicialmente, as taxas de um porto eram pagas em quantidade de barris de vinho. Estes barris, no Reino Unido, foram limitados a uma capacidade mínima de duzentos e cinquenta galões, que corresponde aproximadamente a onze mil litros. A capacidade dos barris, quando cheios, traduzia um peso de, dois mil duzentos e quarenta libras, que é exatamente uma tonelada hoje em dia. Parece ter sido aqui a origem da transformação de tonelada de unidade de capacidade para unidade de massa. (THE SNAME, 1939)

A princípio, as taxas nos portos eram pagas em quantidade de barris de vinho. Totalizavam um tonel até vinte barris de vinho. Acima dos vinte barris, passava a dois toneis. Cedo passou a caracterizar-se os navios pela sua capacidade, na língua inglesa, como “tunnage”, por transportarem outras matérias que não eram cobradas taxas. Foi então estendida a outras cargas, que cobravam uma quantidade de dinheiro por tonel. Nos meados

do século dezassete, as palavras mudaram de tonel para tonelada e passou a designar-se tonelagem. A tonelagem dos navios passou a ser calculada como o quociente do produto do comprimento da boca e do calado por um número que variava entre noventa e quatro e cem. (THE SNAME, 1939)

Já foi demonstrado que a força de impulsão é igual ao peso do fluido deslocado, e que a resultante atua na vertical com sentido de baixo para cima, numa linha que passa num ponto denominado centro de impulsão. Correspondendo ao centro de gravidade do fluido deslocado, o deslocamento de um corpo que flutua, é o volume imerso convertido em peso ou massa do fluido deslocado, este é o motivo de designarmos deslocamento. (SNAME, 1988).

A condição de estabilidade é avaliada pela interação entre a força gravítica e a força de impulsão. Tratando-se de vetores, esta interação vai determinar o comportamento da plataforma. Caso não exista mais nenhuma força externa em atuação, a plataforma é estável. Enquanto a força gravítica e a força de impulsão permanecerem iguais em intensidade e atuadas na mesma linha de ação. Então, a plataforma sujeita a uma força externa, e que esteja em condição de equilíbrio estável, comporta-se do seguinte modo:

- a) Os centros de atuação das forças gravítica e de impulsão encontram-se na mesma vertical (figura oito);
- b) A mais ténue rotação fora da posição de repouso na figura dez de W_1 para W_1L_1 , causa um desvio na atuação das forças iguais opostas. Este desvio, igual e oposto provoca um momento que tende a retornar a plataforma na posição inicial, isto no caso do equilíbrio estável.

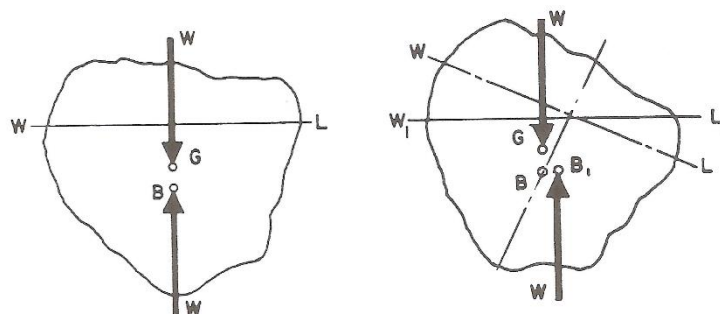


Figura 10 – Interação das forças gravítica e de impulsão (SNAME, 1988)



Para todos os objetos que flutuem, à exceção do equilíbrio neutro, existe pelo menos uma posição em que se verifica a condição de equilíbrio estático. Se assim não fosse, o objeto continuaria a rodar indefinidamente, mesmo depois de a força externa deixar de atuar. Naturalmente, seja o equilíbrio instável, o objeto tende a adquirir a posição de repouso. O caso de exceção é referente ao equilíbrio neutro, já abordado no subcapítulo anterior. Nesta condição, o centro de gravidade coincide com o centro geométrico de rotação. Portanto, qualquer posição na rotação que o corpo adquira, encontra-se em condição de estabilidade. (SNAME, 1988)

No caso de um objeto submerso, acontece que poderá ficar em repouso para uma posição. Esta posição verifica-se quando o corpo roda, até que o centro de gravidade esteja diretamente por baixo do centro de impulsão. Caso o centro de gravidade coincida com o centro de impulsão, como é o de um corpo sólido feito de material homogêneo. O corpo permanecerá em qualquer posição que seja colocado. (SNAME, 1988)

3.3. O metacentro

O metacentro é um indicador muito importante na avaliação da estabilidade. É o ponto em relação ao qual o centro de impulsão varia, no caso de inclinações até aproximadamente de dez graus. O seu centro de impulsão oscila, consoante a inclinação, sendo a posição diferente consoante os ângulos de adorno ou caimento. Esta variação desenha uma curva, sendo o centro desta curva, para pequenas inclinações, designada como metacentro. Este ponto está verticalmente acima do centro de impulsão para cada ângulo correspondente. O raio formado entre o centro de impulsão e o metacentro é chamado de raio metacêntrico. Considerando um corpo simétrico como um paralelepípedo, à medida que a inclinação desse corpo aproxima-se de zero, ou seja a horizontalidade, o metacentro fica geometricamente colocado na linha de eixo de simetria, que também se pode chamar de metacentro inicial. Rigorosamente falando, não designo este ponto somente como metacentro, mas sim como metacentro inicial. Esta posição fixa só se manterá para um corpo direito ou para pequenos ângulos de inclinação. Para ângulos que superem aproximadamente dez graus, a posição do metacentro irá deslocar-se do eixo de simetria, devido à forma imersa do navio que sofre alterações significativas, com a exceção das formas cilíndricas. (THE SNAME, 1939)

Matematicamente, observamos que um navio que sofra um pequeno ângulo de inclinação, $\delta\phi$, como mostra a figura nove, vai ter como consequência uma saída da posição

do centro de impulsão da linha centro do navio, separadas pela distância \overline{GZ} . Designado como braço endireitante.

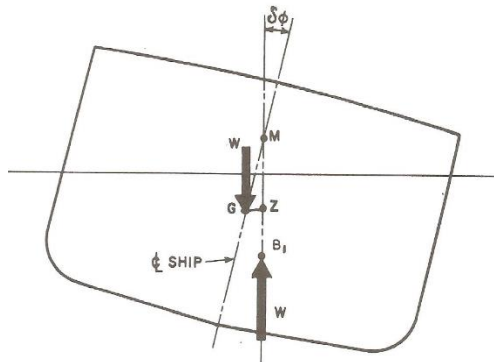


Figura 11 – Braço do momento endireitante (GZ) (SNAME, 1988)

A interseção da linha em que atua a força gravítica, G, na posição direita, com a linha onde atua a força de impulsão, B₁, vai dar origem à posição do metacentro, neste caso transversal. A localização deste ponto, teoricamente, vai variar com o deslocamento e a inclinação do navio. Mas, para efeitos de cálculo, consideramos uma posição fixa do metacentro para ângulos de inclinação até entre sete e dez graus. Até esta medida, as inclinações são pequenas. (SNAME, 1988).

Como demonstrado na figura nove, conhecendo a localização do centro de gravidade e do metacentro, o momento endireitante para pequenos ângulos pode ser calculado com alguma precisão, utilizando a relação:

$$\overline{GZ} \approx \overline{GM} \cdot \sin(\delta\phi)$$

Esta relação vai servir de base fundamental para os meus cálculos, na medida em que é desejável que durante o processo de afundamento os ângulos de inclinação não superem os dez graus. Acima deste valor as posições do metacentro e do centro de impulsão vão ter um comportamento diferente, não é linear. Ângulos acima deste valor são tratados num enquadramento próprio das inclinações para grandes ângulos, a abordagem de tal assunto está fora do âmbito da minha dissertação. Portanto, não irei abordar este tema, pelo facto de não pretender exceder os dez graus de inclinação durante o processo de afundamento, como já referido.

A distância \overline{GM} , é um indicador muito importante na estabilidade transversal para pequenos ângulos. É chamada de *altura metacêntrica transversal*. A distância \overline{GZ} , é considerada positiva, devido ao facto de o momento gerado pelas forças gravítica e de impulsão tenderem a impulsionar o navio para a posição direita, como já foi observado.

3.4. Estabilidade Inicial

A estabilidade inicial é medida pela altura metacêntrica de um navio, para a sua posição direita. Este é um cálculo muito frequente, para qualquer navio que navegue no mar, principalmente os navios mercantes, que interagem muito com o transporte de cargas. A acomodação de contentores acarreta maiores cuidados nas condições de estabilidade. O cálculo da altura metacêntrica traduz-se numa expressão em que me baseio na figura doze, para entender no sentido mais geométrico esta expressão:

$$GM = KB + BM - KG$$

Nesta expressão, K designa uma altura e a referência para esta altura é a linha base do navio. Com base na figura, posso observar a importância desta expressão, se o valor for zero. Significa que o ponto M está coincidente com o centro de gravidade. Tanto esta situação como a situação em que este valor é negativo são indesejáveis. Para cada navio, existirá uma altura metacêntrica de projeto, no qual o projetista indica para determinado navio as condições de estabilidade onde estes parâmetros podem ser maximizados.

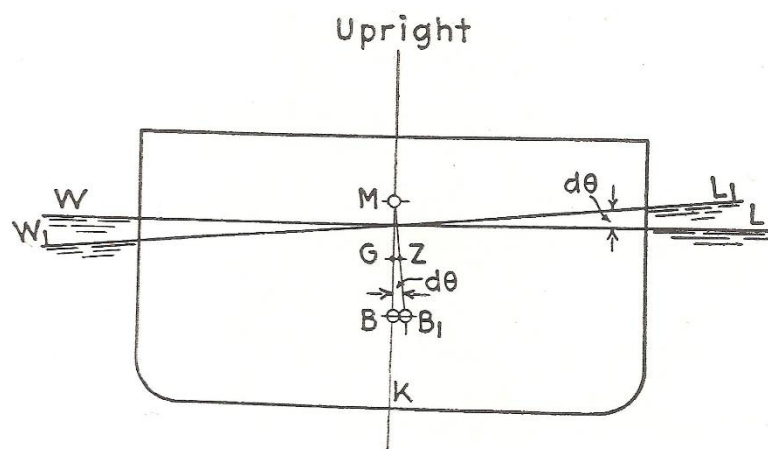


Figura 12 – Altura metacêntrica transversal (THE SNAME, 1939)



Caso seja intenção embarcar um peso elevado, de modo a que altere significativamente a altura metacêntrica, devemos ter em consideração os seguintes requisitos:

- a) Deverá ser elevada, o suficiente nos navios de passageiros, para prevenir o adornamento excessivo e o soçobrar, no caso de inundação de uma porção do navio durante uma avaria;
- b) Deverá ser elevada, o suficiente para minimizar a possibilidade de adornamento excessivo devido ao vento forte transversal;
- c) Deverá ter um valor baixo, o suficiente de modo a que tenha adornamentos e recuperações suaves devido ao efeito das ondas. Caso em que a altura metacêntrica seja muito elevada, faz com que o navio adorne com muita violência, o que se torna extremamente desagradável para quem esteja a bordo.

A definição da altura metacêntrica na construção de um navio é um dos grandes desafios que os arquitetos navais enfrentam, trata-se de uma característica que dependerá das formas do navio e do seu objetivo.

3.5. Estabilidade Transversal

A estabilidade transversal é a determinação do modo como o navio responde perante forças externas e internas no plano transversal. Um navio a flutuar na posição direita pode ser inclinado em qualquer direção. Esta direção aleatória é o resultado da combinação de dois grandes referenciais de movimentos, nomeadamente nos planos, transversal e longitudinal do navio. Para efeitos de cálculo, a inclinação no plano transversal é denominada de adornamento para bombordo ou estibordo. A inclinação no plano longitudinal é denominada de caimento, para vante ou para ré, cada um dos referenciais é abordado separadamente. A abordagem da estabilidade transversal é mais atenta e envolve pressupostos que serão posteriormente aplicados na estabilidade longitudinal. No plano transversal está presente o perigo de um navio soçobrar devido à instabilidade. Este facto no plano longitudinal é descartado.

À semelhança do abordado no capítulo do equilíbrio estático, a estabilidade de um navio pode ser afetada por mau acondicionamento da carga, como posso mostrar na figura treze, o navio do lado esquerdo estava a flutuar na posição direita e foi sujeito a uma força externa. A força de impulsão aplicada em B_1 , em combinação com a força gravítica do navio, irá provocar a rotação no sentido horário, retornando-o à posição direita. A posição do metacentro em relação ao centro de gravidade permite um bom comportamento do navio do lado esquerdo. O navio do lado direito tem carga acondicionada acima do centro de gravidade, este acondicionamento vai provocar instabilidade. O navio vai obter um comportamento diferente devido à combinação entre força gravítica e a força de impulsão, o que irá originar uma rotação no sentido anti-horário. Esta rotação vai influenciar a tendência do navio a soçobrar e é a situação a evitar em todos os casos.

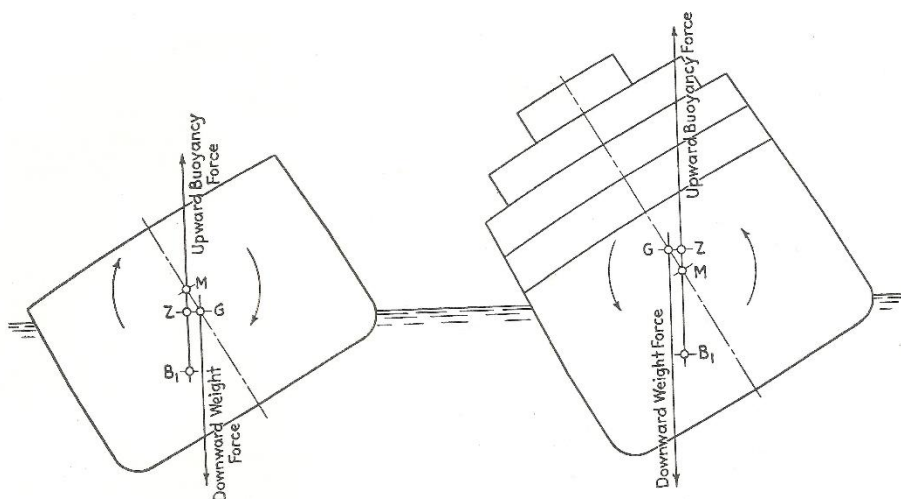


Figura 13 – Atuação das forças de impulsão e gravítica na estabilidade (THE SNAME, 1939)

3.6. Estabilidade Longitudinal

A estabilidade longitudinal é a determinação do modo como o navio responde perante forças externas e internas no plano longitudinal. A grande diferença no estudo destas movimentações reside no valor a que podem atingir as inclinações. No plano transversal, estão envolvidos valores mais elevados que, por vezes, podem atingir valores superiores a quarenta graus. Já no caso das inclinações longitudinais, valores superiores a dez graus raramente ocorrem para condições normais de estabilidade. Daí os princípios presentes no

capítulo da estabilidade para grandes ângulos, superiores a dez graus, serem apenas aplicados no plano transversal. (THE SNAME, 1939)

O plano longitudinal também tem um metacentro, que é análogo ao metacentro do plano transversal. Com base na figura seguinte, e assumindo que o navio se encontra nas seguintes condições:

- Na posição direita e em equilíbrio na linha de água WL;
- O volume do deslocamento inicial é ∇ ;
- O centro de impulsão inicial é B;

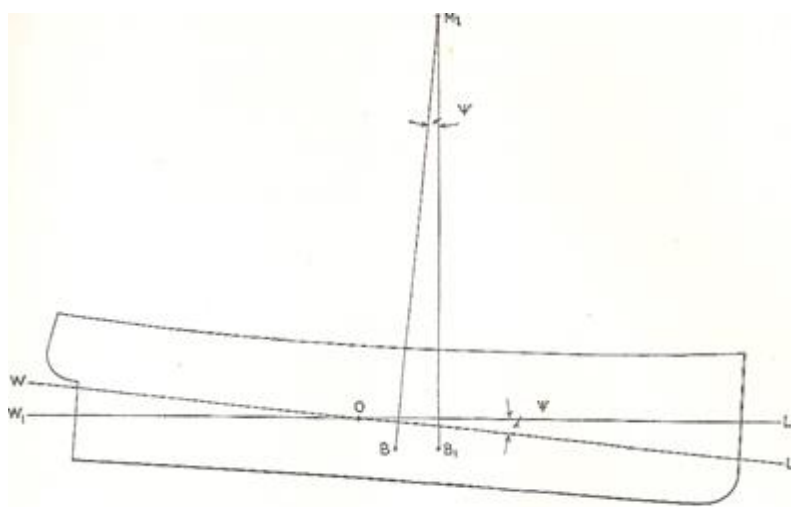


Figura 14 – Metacentro longitudinal (THE SNAME, 1939)

Note-se na figura catorze que a linha de água inicial WL, não é necessariamente paralela à base do navio para que se determine o metacentro. Esta condição de equilíbrio vai ser a consequência da distribuição interna dos pesos. Aqui é desenhada uma linha perpendicular à linha de água inicial WL, que passa no centro de impulsão B. Posteriormente, o navio, devido à atuação de uma força, inclina-se, dando origem a uma nova linha de água W_1L_1 . As linhas de água das inclinações WL e W_1L_1 interseitam-se no ponto O, formando um ângulo Ψ . O que acontece comparando com a situação inicial, é que o volume de deslocamento permanece o mesmo, e o centro de impulsão desloca-se para B_1 . Uma outra linha, perpendicular a W_1L_1 , vai ser desenhada, passando pelo metacentro. (THE SNAME, 1939)

Qualquer que seja o pequeno ângulo de inclinação Ψ , a vertical original que atravessa B e a posterior vertical que atravessa B_1 intersestarão o ponto M_1 . O ângulo pelo qual se



intersectam as linhas de água, será igual ao ângulo da sua inclinação. Se Ψ for um ângulo pequeno, o suficiente que se aproxime de zero, a altura do metacentro longitudinal é definido. Então, o metacentro longitudinal, para qualquer linha de água de inclinação, é o ponto de interseção entre as perpendiculares da linha de água original e a linha de água de inclinação, que passam pelos respectivos centros de impulsão B e B₁. (THE SNAME, 1939)

Se observarmos de um ponto de vista rigoroso o comportamento do metacentro, longitudinalmente vai ser diferente do que acontece no plano transversal, mesmo para ângulos inferiores a dez graus. Assumo, para formas convencionais, que os navios do ponto de vista transversal são simétricos longitudinalmente, para navios ditos normais, isto não acontece, a proa tem uma função diferente da popa portanto, formas diferentes. Os navios no plano longitudinal não possuem simetria. Assim para cada ângulo de inclinação, o metacentro não vai ser uma posição fixa, pelo que irá existir uma movimentação do metacentro à semelhança do que acontece para inclinações a grandes ângulos mas com valores de deslocamento do metacentro muito mais reduzidos. Daí, de modo a tornar os cálculos simplificados, dizemos que longitudinalmente o metacentro é uma posição fixa. Quando ouvimos falar de alturas metacêntricas longitudinais eles dizem sempre respeito ao navio na posição direita e em equilíbrio (THE SNAME, 1939). Para o determinarmos, o navio sofre uma inclinação infinitesimal, de modo a que possamos fazer as interseções das perpendiculares, como feito anteriormente para conseguirmos atribuir um valor à posição do metacentro. Como também os ângulos de inclinação não excedem os dez graus, os valores determinados tornam-se satisfatórios.



4. ESTABILIDADE EM AVARIA

A estabilidade em avaria é o estudo das condições de estabilidade, na ocorrência de um dano estrutural no casco, que permite a entrada de água. Quando a inundação ocorre, dividimos em duas grandes consequências. Uma diz respeito à perda de flutuabilidade e possível mudança no caimento, que provoca a inclinação do navio. A outra consequência é a nível transversal, que é traduzida numa perda de estabilidade que pode culminar no soçobrar do navio.

A indústria naval projeta os navios de modo a que possam manter a flutuabilidade em caso de avaria pela compartimentação, algo que tem uma relação custo/benefício bastante pertinente. A subdivisão dos navios em compartimentos, inevitavelmente, acarreta custos acrescidos no projeto. Só navios preparados para combater se aproximam dos ideais da compartimentação. Na área comercial ou turística, torna-se um compromisso entre o custo e a segurança. Este dilema foi parcialmente resolvido para os navios de passageiros pelo desenvolvimento de padrões internacionais, considerados por todos aceitáveis, considerando o tamanho dos navios, número de passageiros que transporta, a natureza do serviço, ambiente de operação, entre outras. (SNAME, 1988)

A bibliografia referente a este capítulo é variada e extensa, sendo uma preocupação atual. Ao longo do tempo, vão sendo estudadas novas formas e métodos de salvaguardar a vida humana no mar. É um tema que está em constante evolução.

4.1. Efeitos gerais da inundação por avaria

Quando um navio sofre um rombo no seu casco, a água circundante vai entrar por esse rombo, até que os espaços entre o mar e o compartimento danificado atinjam um equilíbrio, ou mesmo até que o navio afunde. As anteparas estanques têm a função de garantir que não existe passagem de água entre o compartimento afetado e os restantes. Então, diremos que quanto mais anteparas estanques possuir o navio menor seriam as probabilidades de se afundar, o que não corresponde à verdade. Não é possível construirmos um navio que resista à mais violenta colisão, ao pior dos encalhes, ou mesmo ao torpedo mais explosivo. O grau a que um navio se aproxima do ideal é a verdadeira medida da sua segurança. (SNAME, 1988).



A probabilidade de um navio sobreviver a um dano sofrido, originando uma inundação, está dependente em determinado número de variáveis e fatores correlacionados (COMSTOCK e ROBERTSON, 1961), sendo um dos mais relevantes a extensão dos danos e a localização e número de anteparas estanques.

Dependendo do comprimento do rombo, profundidade e sua localização relativamente às anteparas estanques, pode ou não comprometer a flutuabilidade do navio. Temos, como exemplo, o que se passou com o navio Titanic, que sofreu um rombo longitudinal de grandes dimensões, atingindo inúmeros compartimentos. Ora, mesmo com compartimentação estanque, se forem atingidos mais do que aqueles que o navio necessita para manter a flutuabilidade, certamente que se irá afundar, num curto espaço de tempo. Daí, a implementação do maior número de anteparas estanques não se traduzirá em maior segurança. O dano pode ocorrer na própria antepara, atingindo no imediato dois compartimentos. Por este motivo, para um dado comprimento do rombo, um aumento no número de anteparas estanques, pode aumentar a probabilidade de danos nas próprias anteparas, o que irá reduzir em vez de aumentar as hipóteses de o navio manter a flutuabilidade.

A organização internacional SOLAS analisou estatisticamente os dados das colisões, particularmente dos navios de carga e passageiros, para determinar a localização e a extensão dos danos. Os resultados indicaram que os rombos podem variar desde um a dois metros, até mais de trinta metros na extensão longitudinal (SNAME, 1988). Muitas colisões de baixa energia ocorrem sem produzir penetração no casco abaixo da linha de água. Não provocarão inundação, os danos são geralmente superficiais ou muito pouco profundos. Rombos de extensão intermédia longitudinal, que são considerados os que vão desde os seis aos quinze metros, podem variar na penetração do casco desde a moderada até á profunda. Este tipo de danos é geralmente resultado das colisões com um ângulo de incidência próximo dos noventa graus. Uma colisão de grande energia pode resultar em penetrações máximas associadas a um rombo longitudinal extensível, e são estas colisões que trazem consequências para a perda de flutuabilidade dos navios.

As consequências da inundação de um navio têm uma sequência de acontecimentos, em que secciono os mais relevantes:



- a) ***Varição do calado***: o calado varia de tal forma, que o deslocamento da parte que não está inundada, é igual ao deslocamento do navio antes da avaria ocorrer, menos o peso da água que entrou pela abertura ao mar.
- b) ***Varição do caimento***: o navio irá obter um caimento no sentido da localização da abertura ao mar, até que o centro de impulsão intersecte o plano transversal que atravessa o navio pelo centro de gravidade e perpendicular a linha de água de equilíbrio.
- c) ***Adornamento***: se o espaço inundado for assimétrico relativamente à linha centro, o navio irá adornar para o bordo em que se encontra a abertura para o mar. No caso específico do adornamento, existem algumas considerações relativamente à estabilidade, nomeadamente a altura metacêntrica. Se GM, na altura da inundação for negativa, o navio adornará até atingir a estabilidade, ou corre o risco sério de soçobrar. O adornamento progressivo pode agravar as condições da inundação, pelo facto de a abertura ao mar poder ficar submersa.
- d) ***Varição na estabilidade***: a inundação fora do centro de gravidade provoca mudança na estabilidade transversal e longitudinal. As distâncias onde vão ser mais expressivas tais mudanças são o KB e o BM. Estes pontos de referência irão para novas posições, o que altera o modo como o navio comporta-se, focando uma mudança na estabilidade.
- e) ***Varição do bordo livre***⁸: o bordo livre é bastante importante para a estabilidade transversal. A altura desta distância vai influenciar diretamente a amplitude de adornamento. À medida que o navio vai afundando, naturalmente, o bordo livre diminui e, conseqüentemente, vai existir uma limitação para os ângulos de adornamento. A altura do bordo livre pode ser tal que, quando o navio adorna, a água chegue ao convés, submergindo parte do convés. Esta é uma situação já de afundamento eminente, no caso de uma inundação.

⁸ Bordo livre é a distância vertical desde a linha de água até ao convés principal.



- f) **Perda total do navio:** como o próprio nome indica, é o ponto de não retorno. O navio irá diretamente para o leito. O que acontece nesta fase é simplesmente a superação do peso do navio relativamente à força de impulsão denominada perda de flutuabilidade.

4.2. Compartimentação

Todos os navios que navegam no mar oceânico são expostos a determinadas condições, que por vezes podem ser de grande esforço mecânico para a estrutura dos navios. Estão sempre expostos ao derradeiro perigo de afundamento, que pode ocorrer com a entrada de água pelo casco. Com o objetivo de reduzir este risco, ou minimizar as suas consequências, os projetistas têm em consideração a compartimentação estanque, de modo a confinar a água num só espaço e, assim, limitando a entrada de água somente a esse compartimento.

Desde a altura em que os navios eram construídos em materiais flutuantes, como o caso da madeira, não existia a garantia das condições de flutuabilidade, mesmo que ocorresse a sua inundação total, existindo somente a preocupação de obter flutuabilidade quando o navio estava a operar de modo intacto. Caso o navio sofresse um rombo, era quase certo o seu afundamento. Foi com o mais famoso desastre marítimo, o *Titanic* em 1912, (GILLMER, 1972) que ocorreu o maior desenvolvimento no que diz respeito à segurança marítima. Os projetistas deram uma nova importância às consequências de um rombo no mar, relevando o valor do salvamento da vida humana. As perguntas na construção naval passaram a ser: como evitar que o navio afunde rapidamente, para permitir o salvamento das pessoas? Ou como manter a flutuabilidade, mesmo que ocorra uma inundação grave? As respostas para estas questões centraram-se na compartimentação estanque dos navios. Por exemplo, se ocorrer um rombo a vante no navio, isola-se essa área ficando aberta ao mar. As pessoas passariam para ré, permitindo, a navegabilidade e garantia de flutuação da plataforma, de modo a navegar até a um porto seguro.

Os navios de guerra são construídos nestes pressupostos, desde que começaram a ser construídos em metal. Devido a situação de combate, estão expostos a rebentamentos e rombos no casco abaixo da linha de água. Estes tipos de navios são extremamente



compartimentados e, por vezes, é excecional a sua capacidade de flutuabilidade, por mais gravesos que sejam os danos no casco e o nível de inundação dos compartimentos.

4.3. Efeito dos espelhos líquidos

A compartimentação dos espaços no navio acarreta também outros perigos. O centro de gravidade de um peso movimentado ou adicionado permanece fixo no navio, independentemente do seu movimento (GILLMER, 1972). Isto é verdade no caso de os pesos serem sólidos e estejam numa posição fixa, sem deslizarem. No caso dos líquidos, só se verifica se o compartimento estiver completamente cheio, caso contrário se o compartimento estiver parcialmente cheio com um líquido, ocorre um fenómeno físico chamado de efeito de espelhos líquidos. Este efeito ocorre quando o navio é inclinado e o líquido tende a ocupar sempre a posição mais baixa na direção da inclinação. A superfície do líquido, com vista a manter a sua horizontalidade, transmite uma inércia, ampliando a oscilação do navio em relação às condições de agitação marítima. Este efeito pode provocar um aumento da instabilidade. Compartimentos parcialmente cheios são sempre indesejáveis. Alguns espaços compartimentados, inevitavelmente, encontram-se parcialmente cheios, como o caso dos tanques de água, combustível e óleo. (GILLMER, 1972).

Na nossa experiência do quotidiano, notamos como é difícil manter o equilíbrio de uma bandeja cheia de água. Neste exemplo pratico, observamos que na origem deste facto está presente o efeito dos espelhos líquidos. Um navio contém inúmeros tanques com líquidos de diferentes propriedades físicas, como o óleo, água doce e salgada, combustíveis, etc.

Se considerarmos um navio que flutua direito no plano de água WL, é inclinado por um pequeno ângulo Φ nova linha de água será W_1L_1 como é observável na figura quinze.

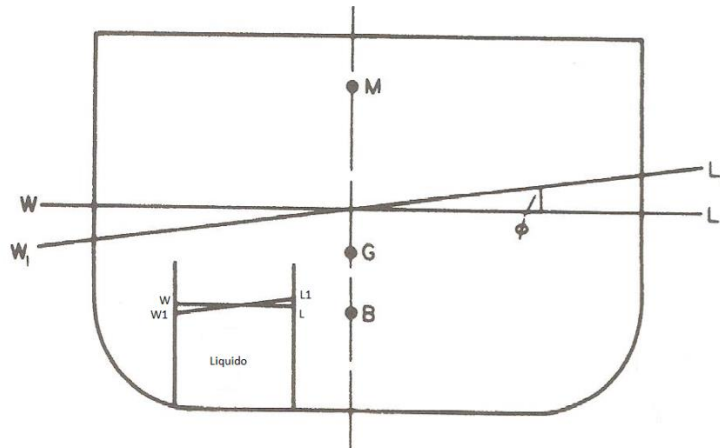


Figura 15 – Efeito dos espelhos líquidos (RAWSON & TUPPER, 2001)

O líquido que está no tanque também vai-se movimentar do mesmo modo que o navio. Este efeito provoca uma diminuição do momento endireitante do navio, e com isto uma dificuldade acrescida ao tentar voltar á posição direita. (RAWSON & TUPPER, 2001).

Para compreendermos melhor o efeito dos espelhos líquidos, no âmbito da minha dissertação, vou incidir no processo de afundamento para pequenas inclinações, não excedendo aproximadamente os dez graus. Assim, todos os pressupostos da arquitetura naval serão para pequenos ângulos de inclinação. Se considerasse os grandes ângulos de inclinação durante o processo em que o navio se afunda, correria o risco de perder o controle do processo e não obteria certamente o afundamento horizontal da plataforma.

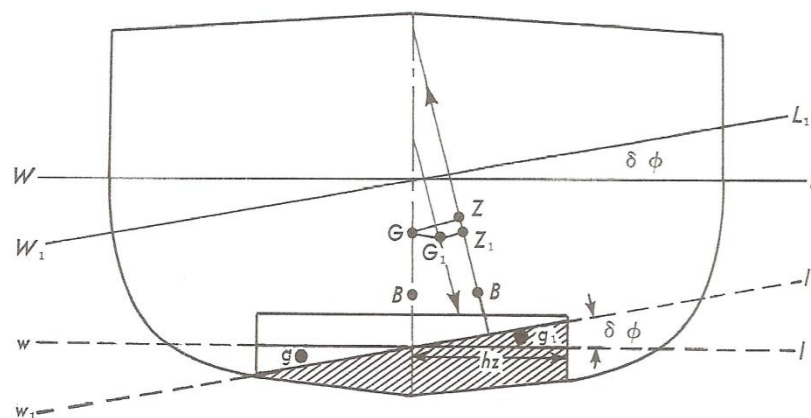


Figura 16 – Subida do GZ devido ao efeito dos espelhos líquidos (GILLMER, 1972)

Consideramos um pequeno ângulo, assumindo uma inclinação tal que o líquido no tanque não toque no topo, nem exponha a sua base. (GILLMER, 1972). A figura dezasseis mostra um compartimento parcialmente cheio com um líquido e uma superfície ω_l estando



o navio na posição direita. Quando é inclinado com um pequeno ângulo $\delta\Phi$, a superfície do líquido muda para $\omega_1 l_1$ permanecendo sempre horizontal.

O tanque possui uma largura $2h_z$, e comprimento L . À medida que é inclinado para o ângulo $\delta\Phi$, o líquido no tanque terá de se ajustar, de tal modo que a superfície permaneça na horizontal. Estes ajustes resultam numa mudança transversal do centro de gravidade do navio, devido à mudança do volume do líquido (v_0). Esta mudança pode ser expressa através de uma equação de momentos tomados sobre o plano central do navio.

$$\overline{gg_1} \cdot \gamma_t \cdot v_0 \cong \overline{GG_1} \cdot \Delta$$

A deslocação de volume de líquido, pode ser expressa como uma equação de momentos relativo ao plano central do navio, acima mostrada. (GILLMER, 1972).

Desenvolvendo a expressão:

$$\begin{aligned} \overline{gg_1} \cdot v_0 &= \int_0^L \frac{1}{2} \cdot h_z \cdot \tan(\delta\varphi) \cdot \frac{4}{3} \cdot h_z \cdot h_z \cdot dz \leftrightarrow (\text{GILLMER, 1972}) \\ &\leftrightarrow \overline{gg_1} \cdot v_0 = \left[\frac{2}{3} \cdot \int_0^L h^3(z) \cdot dz \right] \cdot \tan(\delta\varphi) \end{aligned}$$

O integral $i = \frac{2}{3} \cdot \int_0^L h^3(z) \cdot dz$, é definido como o momento de inércia da área de superfície em relação á linha central do tanque, e ficará:

$$\begin{aligned} \overline{gg_1} \cdot v_0 &= i \cdot \tan(\delta\varphi) \leftrightarrow i = \frac{\overline{GG_1} \cdot \Delta}{\tan(\delta\varphi) \cdot \gamma_t} \leftrightarrow \overline{GG_1} = \frac{i \cdot \tan(\delta\varphi) \cdot \gamma_t}{\Delta} \leftrightarrow \\ \overline{GG_1} &= \frac{\gamma_t \cdot i}{\gamma_{sw} \cdot \nabla} \cdot \tan(\delta\varphi) \leftrightarrow \overline{GG_1} = \frac{i \cdot \sin(\delta\varphi) \cdot \gamma_t}{\cos(\delta\varphi) \cdot \gamma_{sw} \cdot \nabla} \end{aligned}$$

A teoria metacêntrica para pequenos ângulos diz-nos que $\overline{GZ} = \overline{GM} \cdot \sin \theta$, (RAWSON & TUPPER, 2001). Então posso relacionar trigonometricamente a expressão desenvolvida com a teoria metacêntrica para pequenos ângulos (RAWSON & TUPPER, 2001):

$$\begin{aligned} \overline{G_1Z_1} &= \overline{GZ} - \overline{GG_1} \cdot \cos(\delta\varphi) \leftrightarrow \overline{G_1Z_1} = \overline{GZ} - \frac{i \cdot \sin(\delta\varphi) \cdot \gamma_t}{\cos(\delta\varphi) \cdot \gamma_{sw} \cdot \nabla} \cdot \cos(\delta\varphi) \leftrightarrow \\ \overline{G_1Z_1} &= \overline{GZ} - \frac{i \cdot \sin(\delta\varphi) \cdot \gamma_t}{\gamma_{sw} \cdot \nabla} \leftrightarrow \overline{G_1Z_1} = \left(\overline{GM} - \frac{i \cdot \gamma_t}{\gamma_{sw} \cdot \nabla} \right) \cdot \sin(\delta\varphi) \end{aligned}$$



A expressão final com base na teoria de inclinação para pequenos ângulos, considera a redução no \overline{GM} devido à superfície livre. Por esta razão, o efeito dos espelhos líquidos tem por consequência uma redução na curva de estabilidade estática do navio (\overline{GZ}) na quantidade $\left(\frac{i}{v} \cdot \sin \theta\right)$. Esta expressão, se aplicada no caso dos grandes ângulos de inclinação, vai acrescer de erro devido ao grande aumento nas áreas de superfície livre.

Este efeito é extremamente perigoso também para sólidos que em grande quantidade se comportam como líquidos, como o caso do carvão, cereais e grão. Pode acontecer um deslizamento para grandes ângulos de inclinação e o navio sofrer uma enorme perda de estabilidade, podendo mesmo não conseguir retornar à posição direita, de acordo com os pressupostos demonstrados.

4.4. Inundação controlada

A inundação controlada é utilizada, quando queremos equilibrar o navio para compensar embarque de pesos, consumo dos tanques de combustível e água, ou para aumentar a estabilidade, baixando o centro de gravidade. Este princípio está na gênese da operação dos submarinos. Tem de existir uma coordenação perfeita da inundação dos tanques, para que não fique soçobrado, ou demasiado fora da posição natural.

No que diz apenas respeito a um navio de superfície, existe um diagrama de estabilidade para cada um que nos diz o que provoca a inundação de determinados compartimentos, dependendo da sua localização em relação ao centro de gravidade ou do seu porte.

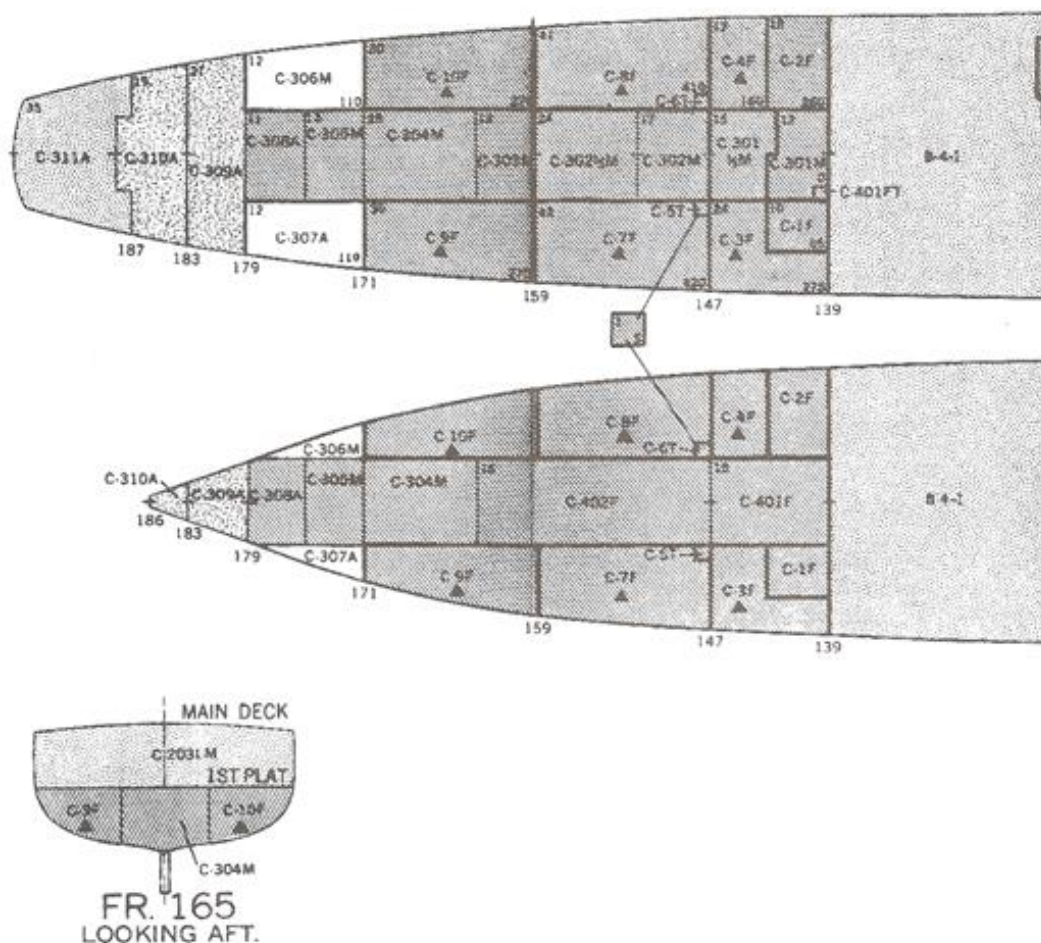


Figura 17 – Exemplo de um diagrama de estabilidade de um navio. (SNAME, 1988)

Com base neste diagrama é representado o impacto na estabilidade com a inundação dos respetivos compartimentos. O primeiro esquema gráfico representa desde a parte de ré até meio navio. O esquema seguinte deste representa o navio desde a proa até meio navio. Obtemos, assim, o esquema do navio completo. Analisando o diagrama, observo o seguinte:

	<p>Traduzem uma diminuição da estabilidade quando inundados, diz respeito à área a meio navio, à área mais a ré, e ao piso imediatamente abaixo do convés principal, ao longo de todo o comprimento. Estes são espaços muito amplos, um colocado a ré, o que irá provocar um caimento a ré (afetação da estabilidade longitudinal), dois estão colocados a meio navio. Com base nesta representação são os maiores compartimentos do navio o que pode provocar forças de</p>
--	--

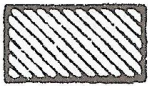


	alquebramento e contra aquebramento, devido ao estado do mar, logo, afeta muito a estabilidade. Por último, o convés imediatamente abaixo do convés principal, pelo facto de se embarcar um peso acima da quilha e na mesma posição do centro de gravidade.
	Configuram uma melhoria da estabilidade do navio. São compartimentos colocados normalmente acima da quilha e abaixo do centro de gravidade. Estão uniformemente distribuídos ao longo do navio e, por isso, configuram uma melhoria da estabilidade em toda a linha.
	Compartimentos localizados nos extremos do navio, à proa (pique tanques) e a ré. Estes tanques têm a função de melhorar o comportamento do navio no mar. Devido ao mar alteroso é comum inundarem-se estes tanques, para uma maior estabilidade perante a ondulação e vaga. Condição necessária para este tipo de compartimentos, é que seja completamente inundada. Caso não estejam completamente cheios, provocam o efeito dos espelhos líquidos, como vimos anteriormente este efeito diminui bastante a estabilidade.
	Assinala compartimentos de dimensão reduzida relativamente a todos os outros. Completamente cheios, ou não, a sua influência na estabilidade é desprezável.

Tabela 2 – Influência na inundação de compartimentos. Compilado pelo autor, e ilustrações com base em (SNAME, 1988)



METODOLOGIA



5. APLICABILIDADE: CORVETA PORTUGUESA (COM DADOS BASEADOS NA CLASSE BATISTA DE ANDRADE)

5.1. Motivação e fundamentos

De entre duas escolhas possíveis, relativamente às classes de corvetas que poderia fazer, sejam a classe “João Coutinho” ou classe “Batista de Andrade”, todos os cálculos e os dados obtidos serão referentes a um navio da classe “Batista de Andrade”, nomeadamente o N.R.P. “Afonso Cerqueira”. O motivo da seleção é completamente arbitrário, sendo justificado pelo facto de a Direção de Navios ter amavelmente cedido toda a informação e dados técnicos referentes à corveta em estudo.

Para executar o estudo do afundamento, a literatura sugere dois métodos: o método da flutuação perdida ou o método da adição de peso. A diferença entre estes dois métodos está na evolução, ou não, das características hidrostáticas de uma plataforma flutuante.

5.1.1. Diferenças entre os métodos da adição de peso e da perda de flutuabilidade

Quando um navio devido a um rombo ou avaria permite a entrada de água, esta água vai consequentemente aumentar o deslocamento do navio, com efeito similar a quando adicionamos um peso solido a um navio. É neste conceito fundamental que o método da adição de peso é baseado, na assunção dos seguintes pressupostos:

- Mudança no deslocamento em peso do próprio navio;
- Mudança no volume deslocado pelo navio;
- Mudança das linhas de imersão;
- Mudanças nas localizações do centro de gravidade, centro de impulsão e metacentro.

O método da adição do peso diz-nos que todas as características de estaleiro do navio terão um comportamento dinâmico, tal como acontece quando adicionamos um peso solido a bordo. Então, o que se pretende, é adicionar peso ao navio, até que este seja superior à força de impulsão exercida. Isto permitirá que o afundamento ocorra.



O método da perda de flutuabilidade mantém determinados parâmetros inalteráveis. Diz que o compartimento que sofre o rombo fica em comunicação livre com o mar, fazendo esta água parte do mar. Então, a parte inundada não contribui mais para a flutuabilidade, ou seja, as forças de pressão vertical exercidas no compartimento afetado, atuam na água que aí circula, invés de atuar no próprio casco. O método da flutuação perdida baseia-se no seguinte:

- O deslocamento permanece igual;
- Os volumes deslocados mantêm-se em magnitude, mas altera-se na sua forma;
- Mudança na linha de imersão;
- O centro de gravidade do navio permanece na mesma localização;
- Mudança nas localizações do centro de impulsão e metacentro.

Escolhi o método da adição de peso, pelo facto de se tratar na realidade de uma adição de pessoa até à perda de flutuabilidade. Irão existir variações no centro de gravidade, metacentro e todos os outros pontos, como mais adiante vou poder demonstrar. E também pelo facto de este conceito de adição de peso ser exaustivamente abordado durante a nossa formação na Escola Naval.

5.2. Comportamento transversal durante o processo

Durante o embarque de água, vamos observar que pontos, como o centro de gravidade, centro de impulsão e o metacentro, vão sofrer alterações. Sendo este um afundamento por adição de peso, a água que entra no navio não voltará a sair. Será considerado um peso adicionado. As condições iniciais para o afundamento são as de deslocamento leve modificado⁹, como a intenção do afundamento é servir para o mergulho recreativo, é desejável que seja despojado de todos os objetos que possam constituir um perigo para a segurança dos mergulhadores, ou que ainda possam ser aproveitadas para outras funções, assim, como motores, geradores, equipamentos informáticos, armamento, etc. As corvetas tem uma linha de calado de projeto de três metros e trinta centímetros, que mediante o gráfico das curvas hidrostáticas, observo que é a condição de carregamento onde o navio obtém uma altura metacêntrica ideal, que é traduzida numa estabilidade ideal. Para o deslocamento leve,

⁹ Esta condição é o deslocamento leve, mais a remoção de todo o material necessário para o afundamento, ou seja, é uma condição de deslocamento inferior ao deslocamento leve definido nos termos legais.

o calado medio é de dois metros e sessenta centímetros. Para este calado, o nível de instabilidade da plataforma é grande. Este parâmetro seria muito importante para o comportamento do navio no mar, ou para o comportamento do navio em condições de mar alteroso. Porém, o afundamento tem lugar em águas calmas. Para o desenvolvimento do afundamento, não será relevante.

5.2.1. Comparativo de estabilidade entre um submarino e um navio de superfície

Um ótimo exemplo comparativo é a entrada de um submarino em imersão, para compreendermos melhor o comportamento de um navio que se afunda. Do ponto de vista da estabilidade, um submarino à superfície pode ser considerado como um navio de superfície. No entanto, as suas características de estabilidade, comparativamente a um navio de superfície com deslocamento semelhante, são diferentes. Posso observar no gráfico um, uma diferença dos momentos endireitantes entre um destroyer¹⁰ e um submarino de deslocamentos semelhantes:

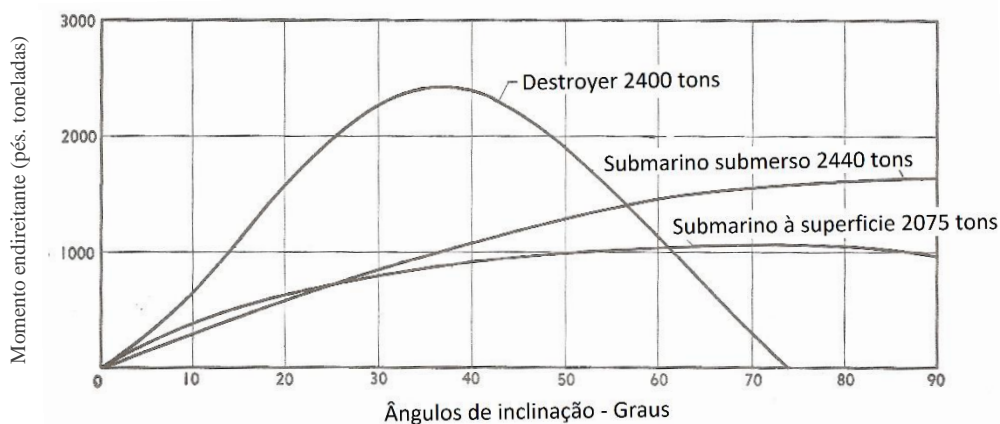


Gráfico 1 – Momentos endireitantes entre submarino e um destroyer (GILLMER, 1972)

Estas diferenças que observo pelo gráfico devem-se a duas características principais presentes nos navios de superfície:

1. **A forma geométrica abaixo da linha de água e a posição de B e M.** Em navios de superfície de formas tradicionais, comparativamente aos submarinos, possuem um

¹⁰ Destroyer - Contratorpedeiro



bordo livre muito superior. Para uma posição favorável de G serão possíveis grandes braços endireitantes e um maior intervalo no valor de estabilidade. Esta situação é devida ao aumento da área da figura de flutuação, que irá crescer quanto maiores forem os ângulos de inclinação, causando uma mudança na posição de B , ao contrário do que aconteceria se a área da figura de flutuação permanecesse constante. Esta situação corresponde ao desenvolvimento de maiores braços endireitantes. Em navios como submarinos esta situação é contrária. Possui um bordo livre bastante reduzido e a sua secção transversal é quase circular, o que não permite uma grande variação na área da figura de flutuação à medida que a inclinação aumenta. Por esta razão, um submarino tem menor capacidade endireitante que um navio de superfície como é representado no gráfico um.

2. **A distribuição vertical de pesos.** O submarino, por norma, tem os seus maiores pesos colocados no fundo, de modo a baixar o G ao mínimo. Esta é o fator principal que permite contornar a menor estabilidade à superfície. Para assegurar uma posição de G de baixo valor, são colocados lastros de chumbo no fundo dos tanques de lastro principais. O seu peso é geralmente cerca de três por cento do volume imerso. Para uma dada altura de B e M , o efeito de diminuir a altura de G , serve para aumentar a estabilidade do submarino. No entanto, o braço endireitante continuará sempre pequeno, em comparação a um navio de superfície e, com base no gráfico um, observo que as curvas para o submarino são achatadas em comparação com a curva do destroyer. Para valores de inclinação entre os setenta e os oitenta graus assume valores nulos, sendo negativos a partir daí.

5.2.2. Comportamento de G , B e M durante o embarque de água

A posição destes importantes pontos de referência aquando do embarque de água irá sofrer variações sistemáticas. Estes pontos são estáticos, quando o navio se encontra em condições normais de deslocamento. No momento em que é adicionado um peso externo ao navio, seja ele um peso sólido ou líquido, estes três pontos variarão simultaneamente. O navio acresce de mais um peso externo, que causará uma mudança no deslocamento, uma mudança na posição do centro de gravidade, um afundamento do navio, que é traduzido num aumento de calado, e um aumento no volume imerso, que consequentemente vai alterar a

posição do centro de impulsão. Serão estas as principais alterações a ocorrer caso o peso seja adicionado na posição do centro de gravidade do navio. Caso contrário, acompanhando estas alterações, vamos ter também inclinações. Vamos verificar o que acontece em cada instante, desde o início de embarque de água:

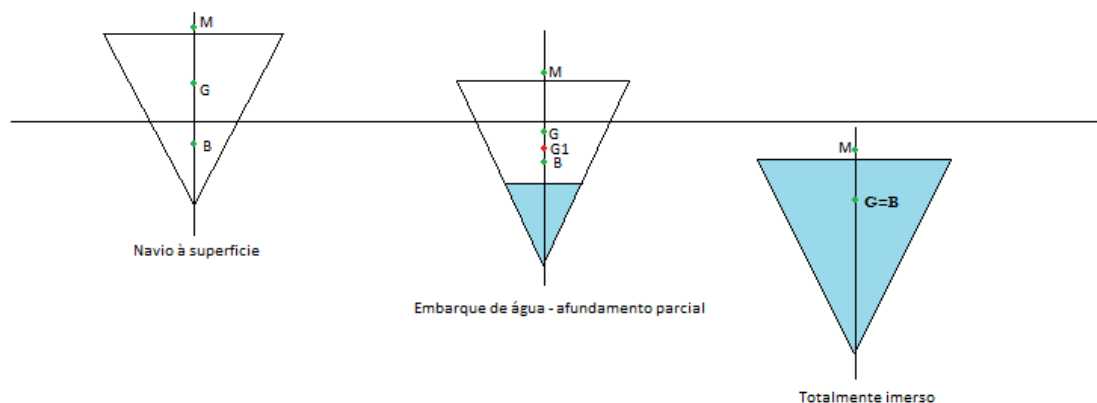


Figura 18 - Movimentação de B, G e M

Na primeira imagem da figura dezoito, temos a condição em que o navio se encontra a flutuar à superfície, ou seja, a condição inicial. Antes da abertura das válvulas, que permitirão o embarque de água. Quando se inicia o processo de afundamento, a água fará a sua entrada pelas válvulas, que se encontram situadas no fundo do navio. Aqui são visíveis alterações na posição do centro de impulsão, o ponto B, que vai elevar-se à medida que a linha de água vai subindo ao longo do navio. Também, vai existir uma descida vertical do centro de gravidade. Este comportamento é devido a uma adição de peso abaixo da posição original do centro de gravidade do navio. Caso consideremos adornamentos e caimentos, contaremos também com o efeito dos espelhos líquidos. Este fator vai acrescer em altura o valor da posição do centro de gravidade, para além do deslocamento horizontal da posição. Este comportamento está representado em Anexo A no gráfico número dois, a diferença de alturas do centro de gravidade com o efeito dos espelhos líquidos e a representação sem este efeito.

A terceira imagem da figura representa o navio completamente imerso. A posição do ponto B ao longo do afundamento é sempre de crescimento até atingir o ponto G. Com o navio completamente imerso, deixa de existir a figura de flutuação e, conseqüentemente, o efeito dos espelhos líquidos. Nesta fase o ponto B coincide com a posição do centro de gravidade. Esta é a última fase do afundamento. Na posição em que o navio estiver aqui, irá assim deslocar-se até ao fundo. A posição de G, depois de uma diminuição na sua localização



vertical, num determinado momento do afundamento irá aumentar ligeiramente. Esta fase será quando a posição da água que está a ser embarcada ultrapassar a posição original do centro de gravidade do navio. É demonstrado, também, o comportamento deste ponto no gráfico número dois em Anexo A.

A posição do metacentro é algo que não pode ser calculado, faz parte das características de projeto do navio, então, recorri as curvas hidrostáticas do navio para mostrar o comportamento da altura do metacentro ao longo do afundamento, no gráfico número dois em anexo é visível que a altura do metacentro inicial vai diminuir até sensivelmente a meio da amostra do gráfico, traduzido num deslocamento aproximado de dois mil e duzentas toneladas a que corresponderá a um calado de quatro metros e cinquenta centímetros, a partir deste valor a posição do metacentro irá aumentar com tendência a assumir o valor inicial.

5.2.3. A evolução da estabilidade

Algumas opiniões podem mostrar que para o processo específico de afundamento, não será muito importante abordar o tema da estabilidade, por motivos vários. Quando se estuda a estabilidade de um navio, os dados desse estudo servem para aferir e garantir o melhor comportamento no mar, sejam em condições favoráveis ou adversas. Inserido neste tema, na minha opinião, a estabilidade torna-se importante quando queremos que o navio esteja sempre direito ao longo de todo o processo. Caso o navio adorne, ou tenha caimento, o sistema desenvolvido para o afundamento irá compensar por fecho e abertura de válvulas. Então, tentar levar o navio para a posição direita vai ser bastante diferente, com um calado reduzido ou com um calado avançado, porque o tempo de resposta vai variar. Para quantificar este fenómeno, comparo os braços endireitantes para cada calado. A teoria diz-nos que quando o deslocamento do navio permanece constante, utilizamos como referência os valores de GZ para determinar a estabilidade estática do navio, ao longo dos ângulos de inclinação (GILLMER, 1972). Por este motivo, tive de comparar valores de GZ para cada linha de calado com um deslocamento fixo para cada calado, baseando-me no gráfico dois em Anexo A, verifico que o navio parte de um calado correspondente ao deslocamento leve, que é de dois metros e cinquenta centímetros. A curva que caracteriza esta condição, entre os oito e os dez graus, passa a assumir valores negativos, o que para um calado de risco que representa a tendência do navio soçobrar para adornamentos acima dos oito graus. É bastante

plausível para esta condição de imersão. O gráfico dois do Anexo A, também, diz-nos que, ao longo do afundamento, o braço endireitante GZ irá aumentar, o que represento para cada linha de calado. Se o braço endireitante aumenta, sendo o momento a força multiplicada por uma distância representada pelo braço endireitante, este momento endireitante também aumentará. Isto diz-nos que o navio voltará à posição direita com menos esforço. Posso assumir, como exemplo, um brinquedo chamado “sempre em pé”. Este brinquedo tem uma base mais pesada que o resto do corpo. Isto permite que a posição de repouso seja a vertical. Aumentando o peso da base e sujeitando o boneco à inclinação, reparamos que voltará mais depressa à posição de repouso. Quando mais pesada for a sua base, com mais força regressará à posição vertical. Isto acontece a um navio se possuir uma altura metacêntrica elevada, tornando o balanço violento e desconfortável. A parte inundada vai funcionar como o peso no boneco. Quanto mais água for embarcada, mais pesado se torna o seu fundo, aumentando assim o braço endireitante, adquirindo o navio o mesmo comportamento que o boneco.

5.3. Comportamento longitudinal

Os princípios envolvidos no comportamento do navio no plano transversal, são aplicáveis de igual modo no plano longitudinal. Não existem diferenças na análise de caimentos relativamente aos adornamentos, com apenas uma exceção, que reside na altura metacêntrica longitudinal. No caso longitudinal, a altura do metacentro assume valores muito elevados. Na verdade, estes valores são de tal ordem elevados que pode assumir-se, com segurança, que não existe a possibilidade de obtermos uma altura metacêntrica longitudinal negativa (GILLMER, 1972).

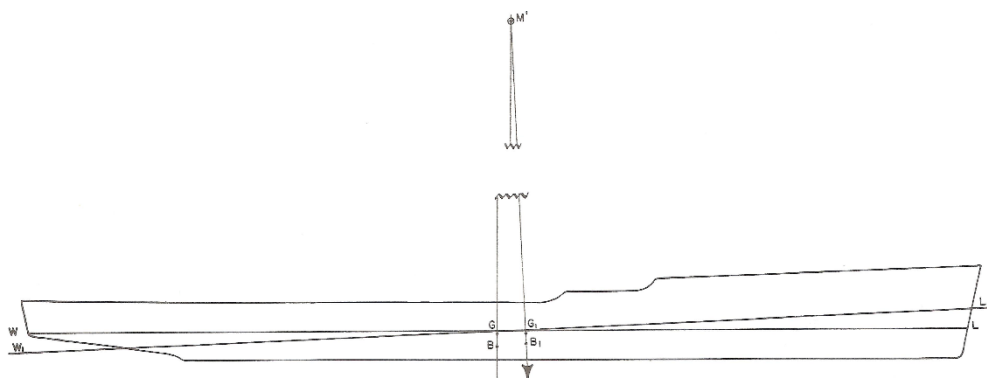


Figura 19 – Efeito longitudinal (GILLMER, 1972)



A figura dezanove é bastante ilustrativa da altura do metacentro longitudinal. Na nossa consciência, é difícil imaginar fisicamente que o navio possa soçobrar longitudinalmente com a mesma facilidade que acontece no plano transversal. Tal é bastante improvável. Para os caimentos, a tolerância será menor que os adornamentos, três graus no máximo. O sistema será calibrado para que, ao longo do afundamento, o navio não exceda os três graus para caimentos e dez para adornamentos.

Faremos, então, o mesmo estudo para os caimentos, para observarmos como evolui a altura metacêntrica. Neste caso, o efeito dos espelhos líquidos vai ser diferente. Transversalmente, a água está limitada pelo costado e possui a liberdade para se movimentar bordo-a-bordo. Longitudinalmente, a água embarcada está limitada pelas anteparas estanques e esta limitação, em muitos tipos de navios, é a solução para atenuar este efeito. Como longitudinalmente não existe o perigo de o navio soçobrar, não consideraremos o efeito dos espelhos líquidos, por simplesmente não acrescentar matéria relevante no estudo deste processo de afundamento, ficando somente realçado o seu efeito no plano transversal.

5.4. Ponto crítico no processo de afundamento¹¹

Qualquer processo de afundamento de um navio, ou uma outra plataforma que não esteja fixa a um qualquer sistema de suporte, ou seja, em que atuem somente na estrutura forças de impulsão e gravidade, num determinado momento não pode ser controlado. Quero com isto dizer, referindo-me ao meu caso de estudo, que posso controlar o processo de afundamento por entradas de água e até mesmo parar, desde que a força gravítica atuada no navio nunca supere a força de impulsão. Ora, a determinado momento do afundamento, esta condição deixa de ser possível e o navio, mesmo fechando todas as entradas de água, subitamente irá continuar a afundar-se, altura em que designo como ponto crítico de afundamento. O sistema de válvulas deixa de ter controlo sobre o comportamento do navio. A posição que o navio adotar quando chegar a esta fase, será aquela em que se deslocará até ao leito, por isso é muito importante que durante o embarque de água o navio sofra apenas pequenos ângulos de adorno e caimento para quando atingir esta fase não haver uma perda de controlo do processo, caso contrário o navio poderá assentar no leito em posição indesejável.

¹¹ Denominei, assim, a altura em que o navio perde a reserva de flutuabilidade.



Identificar este ponto com precisão tem em conta diversos fatores, tais como, a forma exata do casco, a área do casco, a densidade do aço do navio e a densidade da água. Apenas, para obtermos os valores das forças hidrostáticas que variam com as formas do navio. Poderemos, então, fazer uma reflexão teórica de como irá ser o desenvolvimento da interação destas forças fundamentais, que mantém o navio a flutuar.

5.4.1. Comportamento da impulsão e força gravítica

Como foi já referido, para corpos flutuantes o peso de todo o corpo deve ser igual à força de impulsão, que é o peso do fluido, cujo volume é igual ao volume da parte imersa do corpo flutuante (ÇENGEL & CIMBALA, 2007).

$$\begin{aligned}
 I &= \text{Peso} \leftrightarrow \\
 &\leftrightarrow \rho_f \times \nabla \times g = m_{\text{navio}} \times g \leftrightarrow \\
 &\leftrightarrow \rho_f \times \nabla \times g = \rho_{\text{navio}} \times V_{\text{total}} \times g \leftrightarrow \\
 &\leftrightarrow \rho_f \times \nabla = \rho_{\text{navio}} \times V_{\text{total}}
 \end{aligned}$$

A densidade do aço usado na construção naval é sete a oito vezes superior à densidade da água. Como foi demonstrado no capítulo da flutuabilidade, quando um objeto de densidade superior é colocado num fluido de densidade inferior, este afunda. O motivo pelo qual os navios não afundam, está na disposição desse aço. Na relação da expressão que diz respeito ao peso do navio, a densidade do navio tem em conta a estrutura própria, assim como os compartimentos e espaços no seu interior. Estes espaços, geralmente preenchidos com ar, obviamente para possibilitar a nossa habitabilidade, combinados com o próprio material de construção do navio, irão caracterizar a densidade total do navio. Em condição de flutuação, este valor é inferior à densidade da água.

Na expressão acima demonstrada, está traduzida a condição necessária para garantirmos a flutuabilidade. Nesta expressão existem dois parâmetros que, dadas certas condições são fixos, nomeadamente, a densidade do fluido (ρ_f) e o volume total do navio (V_{total}). Em contrapartida, os parâmetros dinâmicos são, o volume deslocado (∇), que varia em função da imersão e vai ter um valor máximo igual ao valor do volume total, situação em que o navio está totalmente imerso a densidade do navio (ρ_{navio}). Este material não possui propriedades metamórficas. Então a densidade do navio não se altera. Os



compartimentos, anteriormente na condição de flutuação, que estavam preenchidos com ar, vão progressivamente ser preenchidos com a água que vai ser embarcada. Daí a densidade total ser maior do que na condição anterior. A parte esquerda da expressão, que traduz a força de impulsão, para que ocorra o afundamento, será sempre menor que a parte direita da expressão, que traduz o peso. Nesta fase, o peso tem em consideração o volume deslocado pelo navio e o peso do próprio navio.



6. MODELO EXPERIMENTAL

6.1. Objetivos

Pode ser difícil determinar, por vezes, o comportamento físico de uma realidade, baseando-nos apenas em modelos e pressupostos matemáticos por estes motivos, penso ser importante e muito útil a construção de um modelo à escala, que me permitirá testar e calibrar todo o sistema, de modo a obter o comportamento pretendido.

Comecei, numa primeira fase, por definir que forma iria ter o modelo, ou qual o material a ser utilizado. As respostas a estas questões foram sendo apuradas ao longo da fase inicial de investigação. Defini que a melhor escolha seria uma forma simples, que me permitiria testar várias hipóteses de afundamento. Com o tempo adequado, o objetivo seria aproximar a forma do casco do modelo, a uma forma exata à escala de um casco real, com a hipótese de simular os espaços interiores. Esta condição, com uma forma de casco mais simples e com os compartimentos perfeitamente definidos, pode ser simulada com o desequilíbrio do modelo. Ou seja, colocarmos várias distribuições de pesos diferentes, com adornamentos e caimentos iniciais, e testar a resposta do sistema. O objetivo é sempre o afundamento horizontal, independentemente das condições iniciais.

Um sistema que é comandado por um autómato, como neste caso tem inúmeras vantagens. Uma destas vantagens, e aquela que considero a principal, diz respeito à posição de afundamento. Tratando-se de um autómato programável, configurei de modo a que ocorra um afundamento horizontal. Mas, existe, também, a hipótese de ser definido para qualquer ângulo de adorno, caimento, ou mesmo uma combinação destes referenciais, pelo simples facto de o sistema executar o que vem detalhado pela programação do utilizador. Regulando os sensores, obtemos uma posição arbitrária. Fiz uma programação do autómato, com base em simulações e previsões pessoais de como funcionaria o comando de abertura e fecho de válvulas. Ora, sem a execução de experimentações, testes e calibrações, não poderia, com a exatidão que pretendo, afirmar que este sistema funciona. Optar pela construção de um modelo em que posso simular e avaliar à escala, é sem dúvida uma mais-valia para o enriquecimento de qualquer trabalho.



6.1.1. Dimensões, compartimentação e características materiais do batelão

Com base no esquema do batelão em Anexo C, o modelo de teste foi dimensionado para que possuísse dimensões razoáveis. Tem um pontal¹² particularmente elevado. Esta característica propositada tem a função de não permitir entrada de água por cima no modelo, precocemente na fase de testes, permite-me averiguar, com maior precisão, a inclinação do modelo à medida que vai afundando, na medida em que, deste modo, certifico que, para pequenas inclinações, não entrará água pela parte de cima do compartimento.

A parte da compartimentação, também, suscitou algumas dúvidas. Os navios de guerra são fortemente compartimentados, ao contrário dos navios de passageiros, que não contém uma grande compartimentação, por uma questão de conforto, custos e mobilidade no seu interior. Um navio de combate está compartimentado por anteparas estanques e, no interior dessas anteparas estanques, encontra-se ainda mais subdivisões. Estes tipos de navios são concebidos assim, para maximizar a sua flutuabilidade, perante danos provocados por ataque bélicos. A compartimentação estanque é efetuada geralmente anteparas transversais de grande resistência. As anteparas longitudinais possuem outra função, principalmente nos navios mercantes de cargas líquidas ou graneleiros. Para minimizar o efeito dos espelhos líquidos, são colocadas anteparas longitudinais, de modo a reduzir a superfície livre do líquido. Assim, os compartimentos são subdivididos com este propósito.

No meu modelo, considereei quatro anteparas transversais estanques e duas anteparas longitudinais ao centro, de modo a fazer oito compartimentos de inundação e uma zona ao centro seca para colocação de equipamentos relativos ao sistema de comando das válvulas. As anteparas longitudinais permitem, assim, simular movimentos de balanço, como, por exemplo, o desequilíbrio propositado do navio, para verificar se o sistema executa a correção. Com esta divisão central, pretendo simular, também os corredores que estão presentes nos navios de guerra, em que é raro o compartimento, à exceção da ponte, em que conseguimos observar os dois bordos ao mesmo tempo no interior deste.

A escolha do material foi um pouco mais fácil. Defini que a estrutura iria ser em alumínio. O aço também seria considerado, mas tinha o problema de ser demasiado denso, e um modelo, com estas dimensões, em aço tornar-se-ia muito pesado e pouco prático nos testes a serem realizados no tanque, já para não falar da vantagem do alumínio perante a oxidação. Como o modelo vai estar em contato permanente com a água, por ser um metal é

¹²É maior altura do casco, distância vertical desde a parte inferior da quilha até ao convés, no caso do modelo é a distância do fundo do modelo até ao topo.



mais durável que, por exemplo, a fibra de vidro. Construído em alumínio, poderá também servir para trabalhos futuros.

6.1.2. Sistema de aplicação para afundamento real

Este é um modelo que não se encontra construído estruturalmente à escala. O objeto de estudo em questão é o comportamento do sistema perante a inundação controlada e a sua resposta perante os desequilíbrios, já que a resposta do sistema é independente da forma do casco. Resumidamente, o modelo é alimentado por uma bateria de doze volts, que por sua vez, alimenta todos os componentes, pela conveniência das eletroválvulas e componentes elétricos do restante sistema. Um sistema real aplicável a um navio não poderia ter esta configuração de comando elétrico das válvulas. A hipótese a considerar seria um sistema de comando elétrico, para uma atuação nas válvulas pneumáticas. Válvulas grandes, como as que se encontram nos navios, para obterem a mesma configuração que o modelo, necessitariam de muita energia elétrica para que funcionasse. Por isso, para válvulas grandes, o comando pode ser pneumáticas mas a atuação é hidráulica.

As ligações do modelo são baseadas no esquema da figura vinte e vinte e dois. Nesta representação encontram-se duas fontes de alimentação, que simbolizam uma só. Por questões de organização e compreensão, separei em duas fontes. Observamos que todos os componentes estão ligados à fonte de alimentação e na saída do autómato, que é referida a cada uma das válvulas que vão ser atuadas diretamente, por serem de atuação elétrica.

No esquema real, como já não se tratam de eletroválvulas, mas sim de válvulas pneumáticas, a atuação dos autómatos será na pilotagem de outras válvulas, que estão ligadas a garrafas de ar pré carregadas, com ar suficiente para todo o afundamento. São simples válvulas pneumáticas de duas vias e duas posições, com retorno por mola. Irão permitir que o ar saia do tanque, para abrir as válvulas que permitem o embarque de água. Para fechar a entrada de água, basta o autómato deixar de atuar nas pilotagens, por serem normalmente fechadas. Como posso demonstrar, os esquemas de atuação são diferentes, mas o princípio de operação é baseado no mesmo esquema. Este sistema é perfeitamente aplicável à escala real, por exemplo, com a sugestão da figura vinte e um.

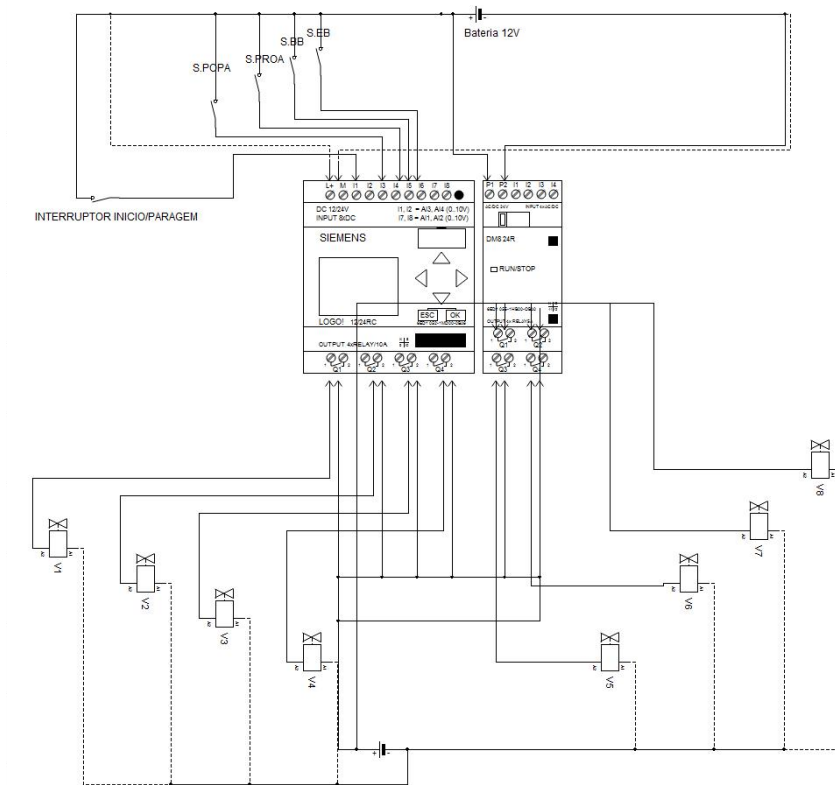


Figura 20 - Esquema elétrico do modelo (elaborado pelo autor em software QELETROTECH)

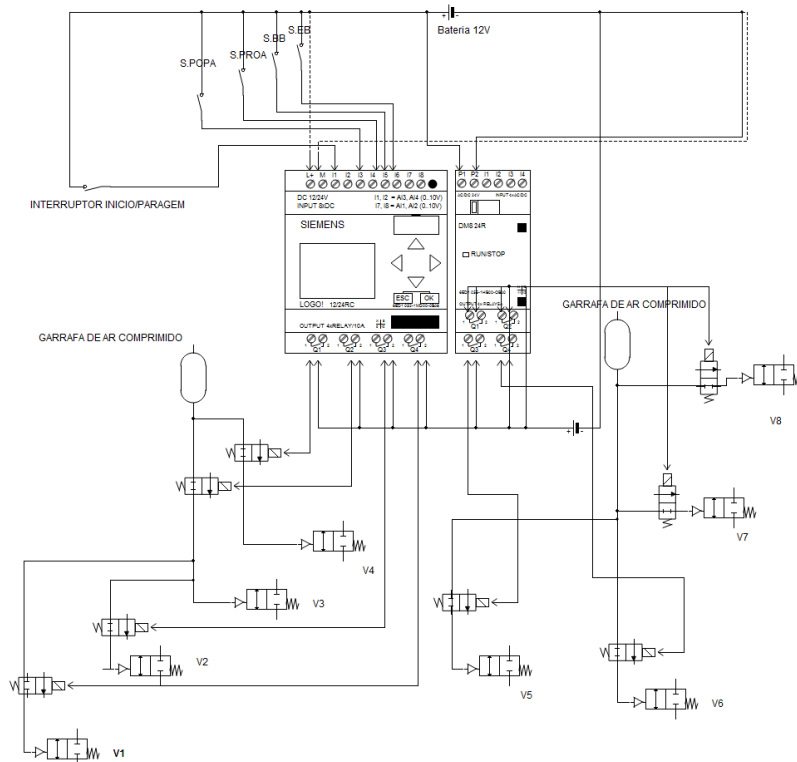


Figura 21 – Esquema eletropneumático aplicado a um caso real (elaborado pelo autor em software QELETROTECH)



6.2. Constituição do sistema

O modelo do sistema é constituído geralmente por um grupo de sensores, um autómato, um grupo de atuadores, nomeadamente as eletroválvulas, e uma bateria de doze volts para a alimentação. Vou mostrar nos subcapítulos seguintes o funcionamento pormenorizado de cada componente principal, excetuando o autómato, que remeto para o capítulo 6.3.

6.2.1. Grupo de sensores de inclinação

Os sensores têm a função de executar a leitura da movimentação do modelo. Fiz a aplicação de um tipo de sensores de inclinação que tem um princípio de funcionamento mecânico. Existe um leque variado de componentes que poderiam executar esta função, nomeadamente componentes eletrónicos e outros, mecânicos, constituídos de mercúrio. Na minha ótica, a aplicação mecânica é mais favorável. Possui duas grandes vantagens relativamente aos sensores digitais e de mercúrio. Os sensores eletrónicos precisam de programação e um dispositivo que execute a leitura do sinal. Para além da leitura digital necessitariam de um componente que converta esse sinal eletrónico em sinal elétrico, para que o autómato consiga fazer a leitura. Em comparação com os sensores mecânicos, estes têm o inconveniente da necessidade da leitura do sinal e posterior conversão em sinal elétrico. Os sensores de mercúrio tem o perigo inerente à manipulação deste metal. Apesar de serem mais precisos que os de esferas, possuem este acréscimo de toxicidade ao meio ambiente. Na sua maioria, são constituídos de ampolas de vidro, que é um material facilmente quebrável. Os sensores, pelos quais fiz a minha opção, são constituídos por dois terminais abertos e uma esfera. O princípio de funcionamento é relativamente simples. O sensor quando não está atuado, a esfera contida no interior não está em contacto com os terminais. Consequentemente, não vai existir a passagem de corrente elétrica. Ou seja, a informação é traduzida em “não inclinação”. Se, por outro lado, for registada uma inclinação de modo a que a esfera se desloque para o sentido dos terminais, fecha o circuito elétrico. Esta ação transmite informação elétrica ao autómato de que neste sensor existe uma inclinação. Na figura vinte e dois, encontra-se uma imagem ilustrativa do funcionamento do sensor.

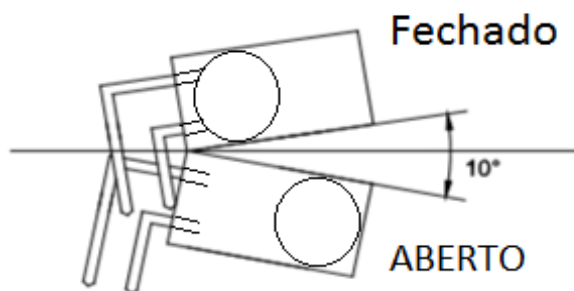


Figura 22 – Funcionamento do sensor de inclinação

Deste modo, optei pela colocação de quatro sensores no total, dois para inclinações longitudinais, a vante e a ré, e dois para inclinações transversais, para bombordo e estibordo.

6.2.2. Grupo atuador

O grupo atuador é constituído pelas eletroválvulas, componentes estes que, mediante a gestão do autómato, irão abrir e fechar, de modo a controlar a passagem de água para os compartimentos. Para aplicação do modelo, a escolha das válvulas corretas tornou-se muito importante, como pude aperceber-me ao longo da parte prática. No mercado existem várias escolhas, no que diz respeito às eletroválvulas. Existem nas mais variadas características, tais como o material que as constitui, as pressões de funcionamento, o ambiente de funcionamento, a temperatura do fluido, o caudal, se a bobina é estanque ou não, etc. A característica que se veio a tornar a mais relevante na escolha foi a pressão mínima de funcionamento. Ora, o batelão encontrando-se a flutuar na água, é obrigatório que exista um diferencial de pressão mínimo, para que exista a entrada de água para o compartimento com a eletroválvula aberta. Forçosamente, teria de escolher eletroválvulas que a sua pressão mínima de funcionamento fosse próxima de zero. Caso contrário, por mais lastro que colocasse no modelo, simplesmente não se afundaria, porque não iria existir passagem de água para o interior dos compartimentos.

Fiz a escolha sobre um tipo de eletroválvulas que apenas com o peso do modelo possibilitava a passagem de água, mas com a contraindicação de uma pressão máxima mais baixa. Ou seja, com as eletroválvulas fechadas o modelo não poderia ser muito pesado, sob o risco de colapsar a membrana que garante a não passagem de água.

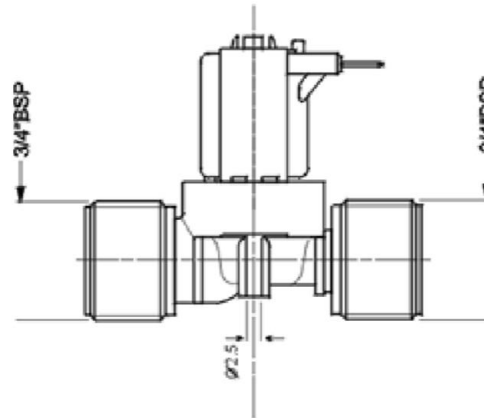


Figura 23- -Eletroválvula de 12V do modelo experimental

Na figura vinte e três, demonstro tratar-se de uma simples eletroválvula de passagem, com a particularidade de ter a bobina estanque à prova de água, e possuir uma configuração no interior que permite a passagem de água a partir de um valor próximo do zero bar.

6.2.3. Alimentação

Para que exista uma alimentação suficiente de todo o sistema, tive de efetuar o levantamento do consumo de cada componente, para aplicar a bateria correta. Como componentes que consomem bateria, temos: o autômato; o módulo de expansão de entradas e saídas e as válvulas.

Uma bateria funciona como um tanque. Quanto maior for a capacidade de um tanque, maior é autonomia do sistema que alimenta. Portanto, mediante o valor mínimo de alimentação, com o seguinte raciocínio:

- Consumo de corrente do autômato: $30\text{ mA} < \text{consumo} < 140\text{ mA}$;
- Consumo de corrente do módulo de expansão: $30\text{ mA} < \text{consumo} < 140\text{ mA}$;
- Consumo de corrente de uma eletroválvula: 500 mA .

Fazendo os cálculos por excesso, assumo o consumo máximo do autômato e do módulo, ou seja, cento e quarenta miliamperes. As válvulas, considero, permanentemente magnetizadas, o que traduz o caso de consumo máximo. O consumo será menor se o sistema executar ajustes, por desligamento das válvulas desnecessárias.



$$\text{Consumo total} = 2 \times (\text{consumo autómato} + \text{módulo}) + 8 \times (\text{consumo 1 válvula})$$

$$\text{Consumo total} = 2 \times (140 \text{ mA}) + 8 \times (500 \text{ mA}) = 4,28 \text{ A}$$

A bateria implantada é de 9 Ah. Portanto é suficiente para fazer frente aos 4,28 A, necessários para o funcionamento do sistema.

6.3. Automação e controlo

O processo de afundamento do modelo assenta num sistema que executa o comando e controlo por *cpu*¹³ completamente autónomo, constituído geralmente por atuadores, sensores e uma interface, que faz a interação entre os sensores e os atuadores. Este componente, que torna possível a autonomia do afundamento, é denominado autómato programável. No subcapítulo seguinte farei a explicação detalhada sobre o seu funcionamento e programação.

As vantagens de automatizar o processo de afundamento são inúmeras, destacando-se a paragem de todo o processo em qualquer altura, até atingirmos a fase crítica, altura em que o navio já não tem reserva de flutuabilidade. O objetivo claro deste sistema é ser o mais abrangente possível. Esta abrangência só é conseguida se, independentemente da forma do casco ou tamanho da plataforma a afundar, comporta-se do mesmo modo, executando o afundamento horizontal, ou num ângulo que seja previamente programado. É nesta fase que é entendida a importância dos sensores. O autómato faz a leitura dos sensores de inclinação, e são estes sensores que transmitirão ao autómato a posição dinâmica do navio ao longo do processo. Daí não ser importante a forma do casco, porque serão os sensores a informar a unidade que comanda o processo, tornando assim o sistema passível de ser colocado em qualquer plataforma flutuante.

6.3.1. Autómato programável

O autómato é o cérebro de todo o sistema projetado. É onde é feita a interligação de todos os componentes. Recebe o sinal da leitura dos sensores nas entradas e, mediante a

¹³ Componente físico de um computador que executa o processamento



programação que o utilizador tenha carregado no autómato, executa as ordens para as saídas, que neste caso são eletroválvulas. Então, vamos abordar, mais especificamente, no que é que consiste este autómato.

Este é um componente que toda a gente já interagiu certamente, mas sem ter a consciência da sua presença. Este componente está presente em muitos sistemas do nosso dia-a-dia, como, por exemplo: escadas rolantes; caixas multibanco; elevadores; semáforos; linhas de montagem fabris; etc. Encontram-se implementados, geralmente, em sistemas que carecem de tarefas monótonas, manobra, sinalização, ou de temporização. Este equipamento é, por excelência, eleito na aplicação de sistemas automatizados. Programado pelo utilizador, este equipamento assegura a execução de funções cíclicas e, mediante a sua especificação, está preparado para operar em ambientes agressivos, como a alta temperatura, ambientes ácidos, de ruído e choques.

Um autómato, na sua génese, é um aparelho de construção robusta e de programação ao critério do fabricante, o que quer dizer que qualquer reparação, ou tentativa de programação de um autómato, requer a formação no fabricante ou representante. Temos um exemplo bastante presente nos nossos navios mais recentes, em que sem a formação particular em autómatos, ninguém terá a capacidade de fazer a leitura programática deles, porque baseiam-se num tipo de programação numa vertente muito própria do fabricante. Nos dias de hoje, a *Siemens*, uma empresa alemã com um forte investimento em Portugal, criou um autómato chamado Logo! Com o objetivo de tornar ao alcance de todos a programação e utilização destes aparelhos, tem uma vasta aplicabilidade, desde sistemas de regas, até ao comando de grandes componentes hidráulicos e mecânicos. Para a atuação em doze volts, existem dois modelos de autómatos em que a sua diferença está basicamente na presença, ou não, do display, o que já não acontece nos modelos de vinte e quatro volts, em que um é caracteristicamente formado por um conjunto de relés no seu interior, que necessitam de ser alimentados, e, o outro, que não necessita de ser alimentado. Alimentando o autómato, as entradas e saídas não necessitarão de energia para funcionar. No autómato de doze volts, são todos atuados inteiramente por relés e com módulos de temporização. Esta configuração traz uma enorme vantagem. O autómato não corre o risco de ficar inoperacional por má alimentação, porque não possui uma fonte de alimentação interna. Está mais protegido deste modo. O único e grande inconveniente que este modelo possui é o facto de tanto as entradas e saídas dos sinais precisarem de alimentação elétrica, tornando assim um esquema de ligação com mais cabos e mais complicado, mas muito mais vantajoso em termos de segurança e fiabilidade. No âmbito da minha dissertação, com a inexperiência que possuo



nestes sistemas, não podia correr o risco de perder um autômato e, consequentemente, todo o sistema, por um erro de cablagem.

6.3.2. Montagem e cablagem do autômato

O autômato que escolhi está limitado a quatro saídas, ou seja, quatro válvulas, o que é uma limitação física. Então, para contornarmos este requisito, a marca de origem deste autômato tem disponíveis módulos de expansão, que permitem aumentar o número de entradas e saídas. Do mesmo modo que existem vários modelos de autômatos, também, existem vários modelos de módulos de expansão. A sua compatibilidade reside na tensão de alimentação. Mecanicamente e como medida de proteção, os pernos dos módulos de expansão só são compatíveis com pernos de autômatos da mesma gama de tensões. É possível acoplar vários módulos de expansão limitados, pelas condições do fabricante. Assim, este método de aumentar o número de entradas e saídas oferece, uma enorme capacidade adaptativa às funções onde queremos aplicar o autômato. Mesmo que a relação de entradas e saídas não seja proporcional. Por exemplo no meu caso, precisarei de cinco entradas (uma para o interruptor, e mais quatro para cada sensor de inclinação), para atuar em oito saídas, o que quer dizer que ficarão sete entradas disponíveis, com as saídas ocupadas pelas oito válvulas. Não é um problema, porque a rotina carregada no seu interior é que faz a ativação das entradas e saídas, consoante a programação. Toda a pormenorização técnica da cablagem do autômato está detalhada em Anexo C.

6.3.2.1. Dificuldades no uso do recetor AM

Na fase de planeamento de construção do modelo, ambicionei executar o acionamento e paragem do processo de afundamento remotamente. Para o tornar possível, optei por usar um recetor, que mediante o impulso de um transmissor, iria transformar esse impulso numa tensão de saída, que atuaria diretamente nos módulos de entrada do autômato. Este tipo de equipamentos recetor/transmissor operam na banda AM de quatrocentos e trinta e três megahertz, que é a gama de frequências mais comum. Depois de ter feito a montagem da placa e alimentação à tensão de funcionamento, deparei-me com inúmeras dificuldades, que na minha ótica devem ser referidas. O autômato, nas suas entradas, possui determinadas características de tensão e corrente de funcionamento, que requerem uma atenção específica



nas capacidades dos sensores e componentes elétricos aí ligados. Ora, no meu caso, a tensão para o autômato assumir o sinal digital zero, ou seja, ausência de um estímulo elétrico é entre zero e cinco volts. Para assumir o sinal digital um, o componente terá de ser capaz de superar os oito volts, até a um máximo de doze. Acontece que, entre os cinco e os oito volts, existe uma área “cinzenta”, que o autômato não considera nem impulso um ou impulso zero, não mencionando valores de corrente, pelo facto de detetar uma gama de correntes tão baixa que a circulação elétrica neste sistema supera sempre os valores que o autômato exige.

Portanto, para acionar ou parar o sistema, as entradas em tensão têm de ser perfeitamente definidas, ou abaixo de cinco volts ou acima de oito, algo que mais à frente mostrou ser incompatível com a placa recetora. Quando a montagem estava toda efetuada e iniciei os testes, acontecia que o relé responsável por iniciar o processo entrava em funcionamento intermitente e, por vezes, sem que tivesse acionado o botão. Este caso só foi compreendido quando a placa foi ligada ao osciloscópio, para verificar que tipo de comportamento estava a ter a placa. O que foi verificado é que a placa possuía muito “ruído”. Ou seja, oscilava em valores de tensão entre um e três volts. Esta característica impossibilita qualquer acionamento preciso, porque o valor de tensão de saída da placa, depois de amplificado, era superior a oito volts. Devido ao ruído acionava e parava imediatamente de seguida o sistema, mantendo-se neste ciclo, por vezes, de modo ininterrupto, pelo simples facto de desenhar uma onda aleatória de ruído, que não podia ser balizada em determinado intervalo de tensões. Este equipamento requeria um filtro eletrónico de sinal e um decodificador do transmissor, para que, no meio de todo o “ruído”, o decodificador identificasse a codificação do transmissor. Embora operem na mesma frequência, o sinal é transmitido com uma codificação, mesmo o recetor detetando o sinal do transmissor como era visível no osciloscópio. Devido a esta barreira, e como o âmbito da dissertação não recai sobre o acionamento, optei por uma solução simplificada, que se baseia no acionamento à distância por cabo elétrico.

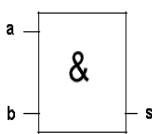
Depois desta dificuldade no acionamento sem fios e depois de inúmeras considerações, a solução mais robusta e que confere uma maior estabilidade no acionamento do sistema é o acionamento por interruptor. Com este tipo de acionamento, elimina-se o problema das interferências na placa recetora AM, à semelhança do que acontece na implosão de edifícios, em que o acionamento é executado por um interruptor que está colocado à distância de segurança, por meio de cabos elétricos. Ficando assim definido, posteriormente, o modo de acionamento, o interruptor colocado no batelão é suficiente para simular o acionamento e paragem do sistema, durante o processo de afundamento.

6.4. Programação

A programação do autómato é feita numa aplicação informática fornecida pelo fabricante do equipamento, em ambiente gráfico relativamente simples e facilmente operável. O programa permite-me programar em vários ambientes, nomeadamente *STL*, *FBD* e *LAD*, dos quais optei pela programação em *FBD*, porque graficamente permite-me observar melhor o resultado de cada função lógica. Este método de programar assenta no conectar e interromper sinais elétricos. O autómato, no seu interior, é constituído por um conjunto de relés. Os relés não são mais do que interruptores eletromecânicos. Assim que entenda o princípio de funcionamento de um relé, torna-se mais fácil a compreensão da programação. Caso contrário, seria um processo moroso de tentativa e erro. A aprendizagem da linguagem para programar o autómato está ao nível de qualquer pessoa que tenha conhecimentos mínimos de lógica, pelo facto do meu sistema não dar uso aos contadores e temporizadores. Se assim fosse, seria necessário um pouco mais de aprendizagem.

6.4.1. FBD (*Function Block Diagram*)

A programação em *FBD*, ou programação por *diagramas de blocos de funções*, é um tipo de programação que opera com símbolos lógicos. Estes símbolos são aplicados em sinais elétricos. Uma das características dos autómatos, quer nos sinais de entrada quer nos sinais de saída, é o facto de serem sempre sinais elétricos. Os blocos de funções são caracterizados por conjuntos de funções lógicas que associam, distribuem, dissociam sinais elétricos. Na tabela seguinte encontram-se resumidas as principais funções lógicas, e os cálculos lógicos e seus resultados:

AND				A saída s está ativa somente quando as duas entradas a e b possuírem um nível lógico um, ou seja, é uma conjunção. Só com a=1 e b=1 , é que s=1 .
a	b	s		
0	0	0		
0	1	0		
1	0	0		

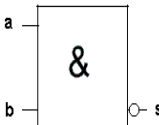
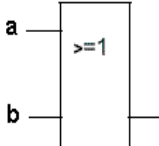
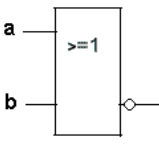
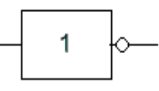
<table><tr><th colspan="3">NAND</th></tr><tr><th>a</th><th>b</th><th>s</th></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr></table>	NAND			a	b	s	1	0	1	0	1	1	1	1	0		Esta função é inversa da função and . A saída s estará sempre ativa, com a única exceção de a e b terem as duas o valor um.
NAND																	
a	b	s															
1	0	1															
0	1	1															
1	1	0															
<table><tr><th colspan="3">OR</th></tr><tr><th>a</th><th>b</th><th>s</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr></table>	OR			a	b	s	0	0	0	0	1	1	1	0	1		A saída s estará ativa sempre que pelo menos uma das entradas tenha o valor lógico um. Esta operação lógica é uma disjunção.
OR																	
a	b	s															
0	0	0															
0	1	1															
1	0	1															
<table><tr><th colspan="3">NOR</th></tr><tr><th>a</th><th>b</th><th>s</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr></table>	NOR			a	b	s	0	0	1	0	1	0	1	0	0		Esta função é a operação inversa da função OR . Aqui a saída s estará ativa, somente, quando as duas entradas estiverem com um nível lógico zero.
NOR																	
a	b	s															
0	0	1															
0	1	0															
1	0	0															
<table><tr><th colspan="2">NOT</th></tr><tr><th>a</th><th>s</th></tr><tr><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td></tr></table>	NOT		a	s	0	1	1	0		Esta função permite apenas uma entrada, em que é negada o sinal lógico da entrada. Funciona uma inversão do sinal lógico da entrada.							
NOT																	
a	s																
0	1																
1	0																

Tabela 3 Principais funções lógicas, compilado pelo autor com base em manual Siemens LOGO!

A operação do programa é relativamente simples. Executo a explicação com base no esquemático do programa em Anexo B. Esta é a representação do modo como atua o programa, num ambiente gráfico similar aos esquemas elétricos, que também tem a conveniência de ser o ambiente de programação. É visível na simulação do programa, que a linha onde passa corrente elétrica e as caixas em operação, ficam vermelhas, significa que estão em atuação.

- A primeira ação é a criação de um interruptor, para iniciar e parar a execução do programa:

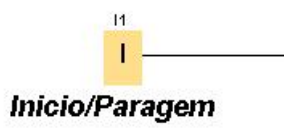


Figura 24 – -Interruptor de paragem e arranque do processo

Este botão está sinalizado como (I1), que significa que o atuador, que fará o início e a paragem do sistema, está introduzido na entrada número um. Este atuador é um simples interruptor temporizado para o início. Ou seja, inicia com um atraso de cinco segundos. Mudando para a posição de desligado, interrompe imediatamente o afundamento, fechando todas as válvulas. Comutando a posição de ligado, continuará o processo do mesmo ponto onde foi interrompido. O sistema funcionará, somente, caso o interruptor esteja comutado para a posição de ligado.

- Com origem do interruptor de início, o programa vai estabelecer-se a um temporizador de atraso na ligação de cinco segundos:

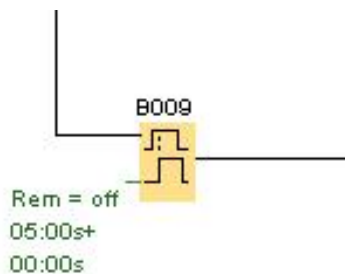


Figura 25 – Temporizador de ligação de cinco segundos

O objetivo da temporização inicial, em que o tempo pode ser definido ao meu critério, serve como margem de segurança para iniciar o sistema. O carregar no botão vai transmitir um desequilíbrio no batelão, visto encontrar-se a flutuar. Serve também para o caso de detetar alguma anomalia de ultima hora como por exemplo uma vedação mal feita, um cabo mal ligado, entre outros, poder parar o arranque do processo.

- Na parte dos sinais de entrada, para além do interruptor de início, temos também quatro sensores de inclinação:

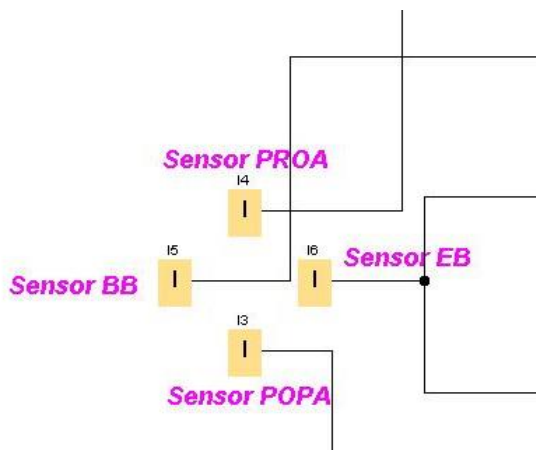


Figura 26 – Grupo de sensores de leitura do movimento

Nestas entradas do autómato (I3, I4, I5, I6), esquematizadas na figura vinte e seis, coloco os sensores de inclinação. A entrada I2 está propositadamente vaga, para um melhor espaçamento físico. Estes sensores fazem a leitura da inclinação do batelão, para a direção que ele incline, passando os dois a três graus. O circuito do sensor fecha e estabelece uma corrente elétrica. Mediante a linha preta, que simboliza a ligação elétrica, vai seguir pelo circuito elétrico até chegar à atuação das válvulas.

- Entre as entradas e as saídas, existe um processamento e uma ação. Esse processamento é efetuado por um conjunto de funções lógicas:

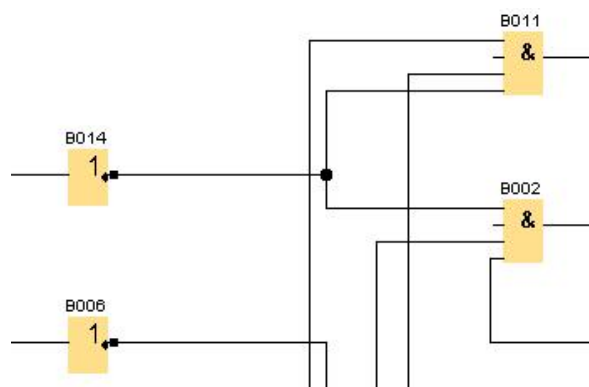


Figura 27 – Grupo das funções lógicas

Na figura vinte e sete podemos observar, o grupo das funções lógicas que fazem a abertura e o fecho das válvulas, mediante a leitura dos sensores de inclinação. Este grupo é constituído por uma função de negação e outra de conjunção, ou vulgarmente chamada de

função logica “ou”. Encontram-se presentes num total de cinco funções de negação de sinal e seis de conjunção.

- Finalmente, nas saídas do autómato, estão conectadas as válvulas (figura vinte e oito):

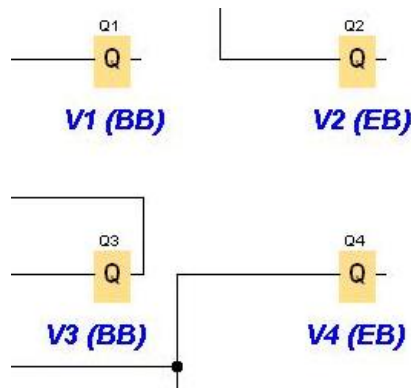


Figura 28 – Esquemático das eletroválvulas nas saídas

Nesta parte do esquema é onde termina todo o processo. É aqui, nas saídas, que o autómato comanda a abertura das válvulas. Como são eletroválvulas normalmente fechadas, para fechar, bastará uma ausência de corrente na respetiva bobina.

Depois de vistas detalhadamente cada uma das funções utilizadas na construção do programa, vou agora detalhar o modo de como o programa funciona. Somente no capítulo dos ensaios, depois do modelo pronto, poderei constatar se o que projetei funciona. Caso contrário, farei as devidas correções. Ora, com base no esquemático numero um em Anexo B, vou mostrar o que acontece, quando um ou, no máximo, dois sensores são acionados. Dois sensores acionados significam um movimento combinado no plano transversal e longitudinal, portanto, não é possível dois sensores diametralmente opostos estarem a ser atuados. Esta impossibilidade significaria que o navio adorna para bombordo e estibordo ao mesmo tempo, ou inclina-se para vante e para ré no mesmo instante. Isto não é possível considerando o navio como uma estrutura rígida.

6.4.2. Acionamento e paragem

Na figura vinte e nove, o acionamento é feito por um interruptor simples, na programação o interruptor está simbolizado por I1, que está ligado a um temporizador:

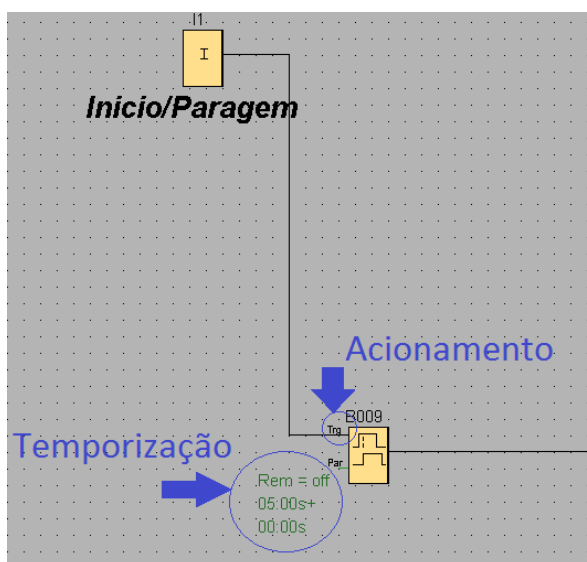


Figura 29 – Programação de início/paragem de programa (em ambiente de programação LOGO! Software)

Na figura acima, demonstro que no segundo bloco a função temporizadora do início, a linha, está ligada ao (TRG), que é designação inglesa para arranque (*trigger*). Quando a linha colorida a preta é percorrida por energia, fica vermelha no programa. Esta ação inicia a contagem do temporizador, que eu defini para cinco segundos. Passados cinco segundos, o sistema inicia o processo.

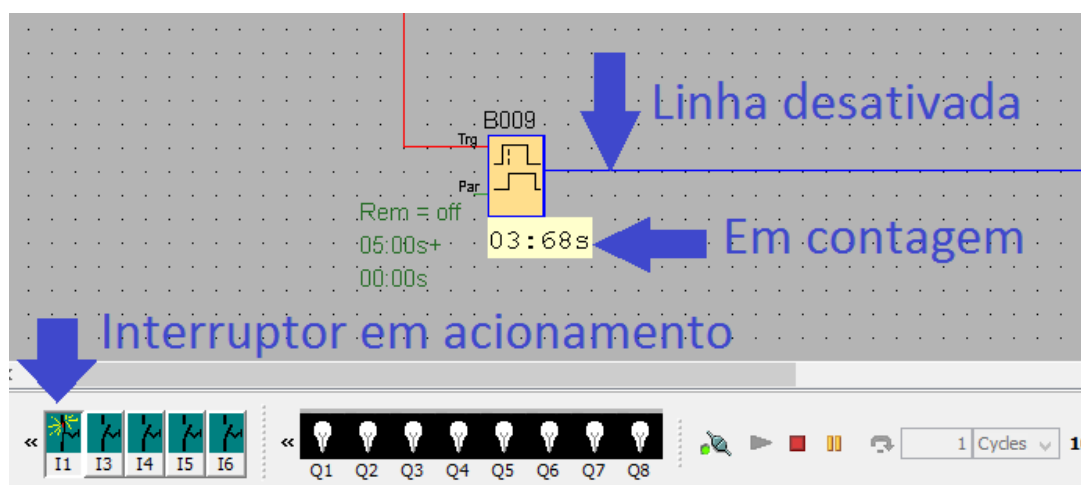


Figura 30 – Interruptor ligado, início da contagem (em ambiente de programação LOGO! Software)

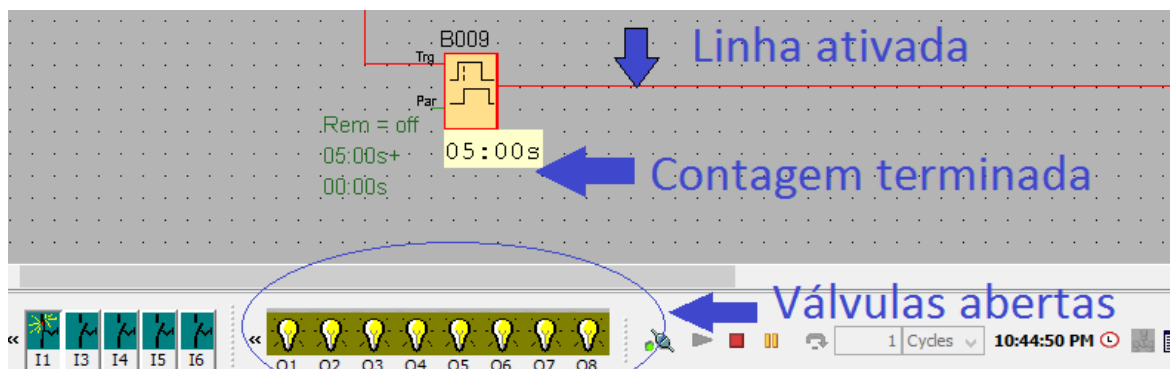


Figura 31 – Acionamento depois da contagem terminada (em ambiente de programação LOGO! Software)

Para a paragem do afundamento, bastará comutar o interruptor para a posição de desligado. O processo sofre paragem, com o corte de energia para as válvulas, restabelecendo-se a condição inicial, visível na figura vinte e nove.

6.4.3. Operação do sistema

No subcapítulo presente, apresento a explicação gráfica da operação de todo o sistema. Com base no Anexo B.

- **Inicialização (esquema um):** a primeira atuação no sistema ocorre na inicialização do processo. O comando I1 está permanentemente atuado, permitindo ao sistema funcionar. Neste esquema, as linhas das válvulas estão sinalizadas a vermelho, o que significa que neste momento as eletroválvulas estão com corrente nas bobinas, ou seja, abertas à passagem de água.
- **Caimento para vante (esquema dois):** o sensor colocado para a deteção de caimento a vante atua, dando origem ao resultado observável. Fecho das eletroválvulas um e dois, para que o batelão interrompa a tendência de agravar o caimento a vante.
- **Caimento para ré (esquema três):** este esquema é similar ao esquema anterior de caimento para vante, com a diferença no sentido do caimento, que ao invés de ser a vante, será a ré. Neste caso o sistema responde do mesmo modo que o anterior.



- ***Adornamento para bombordo (esquema quatro):*** no adornamento, o programa encontra-se esquematizado de modo a fazer o fecho de todas as válvulas do bordo para onde adorna. Neste caso, o fecho de todas as de bombordo.
- ***Adornamento para estibordo (esquema cinco):*** para estibordo, o sistema responde do mesmo modo que o caso anterior. Mas, neste caso, fazendo o fecho de válvulas a estibordo.
- ***Combinação de adornamento e caimento (esquema seis):*** este é o caso em que acontece um movimento simultâneo, relativamente ao eixo longitudinal e transversal. O que o programa vai executar é uma resposta combinada, com o fecho das válvulas nestes dois eixos. O esquema sete vai funcionar de modo similar.

Em suma, a resposta do sistema é fechar as válvulas do lado em que inclina. Assim é possível continuar o processo nos outros compartimentos, de modo a restituir-se a horizontalidade do batelão.

6.5. Avaliação económica da aplicação do sistema

Projetar um sistema para que satisfaça todos os campos, tem de incluir uma parte de estudo da viabilidade económica. O sistema presente nesta dissertação tem como alvo de aplicação preferencial os navios de guerra. E porque razão os navios de guerra? Estes navios possuem características que permitem executar um afundamento mais fácil. As mais relevantes são: o nível elevado de compartimentação. Esta característica permite obter maior controlo do afundamento, minorando o efeito dos espelhos líquidos, devido à quantidade de anteparas presentes; o elevado número de válvulas de fundo, garantem o arrefecimento e funcionamento de sistemas da propulsão, armas e sensores; uma rede de circuitos de ar comprimido, que percorrem a totalidade do navio. Aplicável num grande número de equipamentos tais como: no arranque de motores, turbinas e geradores, nos sistemas de armas e sensores, no carregamento de garrafas dos aparelhos de respiração autónoma; sistemas sanitários; etc.



O sistema encontra-se dividido em dois circuitos principais: o circuito elétrico e o circuito pneumático. O circuito elétrico vai desde os sensores, passando pelas entradas do autômato, fazendo a saída para o acionamento de eletroválvulas, que permitirão a saída de ar das garrafas. O circuito pneumático começa nas garrafas de ar e atua diretamente nas válvulas pneumáticas, que permitem o embarque de água. Resumindo, o autômato gere o sistema, abrindo e fechando eletroválvulas, que permitem a passagem de ar para as válvulas pneumáticas. Toda a parte pneumática do circuito, desde as garrafas, encanamentos e válvulas pneumáticas, encontram-se instalados no navio, sem necessidade de aquisição deste material. Apenas eventuais ajustes e adaptações serão necessários.

A parte elétrica do sistema seria adquirida e montada. Os componentes principais para o funcionamento sem redundâncias a adquirir seriam: um conjunto de sensores de inclinação; um autômato programável; eletroválvulas; baterias de alimentação; cablagem elétrica e um interruptor de acionamento e paragem. A maior despesa recai, sem dúvida, sobre o autômato, e as eletroválvulas. As características deste equipamento dependem muito do número de entradas (número de sensores de inclinação) e do número de saídas (número de eletroválvulas). O mercado possui uma enorme oferta em autômatos. A dificuldade será a sua escolha, por serem muito distintos. Apesar de, no âmbito de funcionamento, serem similares, a maior diferença reside na linguagem da programação, pelo facto de cada marca definir a sua.

A pesquisa que realizei sobre os afundamentos executados leva a concluir que a maior parte do orçamento gasto em todo o processo é aplicado na limpeza e remoção de todos os componentes que possam afetar o ambiente aquático e a segurança dos mergulhadores. Estas ações de limpeza obedecem a critérios e normas instituídas, nomeadamente:

- A Convenção 2009 de Londres na colocação de recifes artificiais;
- A Convenção 2002 de Basileia na desmontagem dos navios;
- A Convenção da OSPAR, mecanismo de cooperação internacional dos guias para a proteção do ambiente marinho do Atlântico Nordeste.

É a parte morosa do processo, a que está sujeita a várias certificações e verificações. Assumindo que a limpeza não entra nos cálculos do processo de afundamento, concentro-me fundamentalmente no sistema de afundamento, efetuando uma comparação entre o método adotado no presente e o método de afundamento controlado.



A título de exemplo, basear-me-ei no projeto ocorrido recentemente em Portimão. Este projeto pretende afundar quatro navios na sua totalidade, para a criação de um parque subaquático. O orçamento total deste projeto ronda os três milhões de euros (Pires, 2012). A limpeza e preparação do afundamento retiram oitenta por cento de todo o orçamento, ou seja, dois milhões e quatrocentos mil euros (Pires, 2012), ficando o restante para a execução dos afundamentos.

Aqui, o orçamento é calculado para a preparação e afundamento de quatro navios. Mesmo dividindo o valor total pelos quatro navios obtemos um valor de aproximadamente oitocentos mil euros. Retirando os oitenta por cento da limpeza, o afundamento ficam por duzentos mil euros. Note-se que estes cálculos efetuados deste modo grosseiro, são apenas representativos das despesas do afundamento, com recurso a explosivos, aplicado a um navio. O valor de referência para este afundamento será de *duzentos mil euros*.

Os componentes mais caros deste sistema são, sem dúvida o autómato e as eletroválvulas pneumáticas. Comparando os duzentos mil euros do processo anterior com os valores de mercado dos restantes componentes, como os sensores de inclinação, interruptores e cablagem, pode representar valores de poupança.

As eletroválvulas de vinte e quatro volts rondam os cem euros a unidade. Dependendo do número de válvulas de fundo a aplicar, depende também o número de eletroválvulas. Se utilizar uma corveta como exemplo, um navio com comprimento entre perpendiculares de oitenta e um metros, contendo dez anteparas estanques e onze compartimentos estanques. Se, para cada compartimento, colocar quatro válvulas (duas para cada bordo), com a exceção da proa, tenho um total de quarenta válvulas, totalizando quatro mil euros em válvulas solenoide. Esta será a maior despesa.

O segundo componente mais caro, e o cérebro de todo o processo, é o autómato. Existem vários critérios de escolha. Abordando novamente o exemplo das quarenta válvulas, no mínimo, necessitarei de quarenta saídas do autómato, para efetuar o comando das válvulas de forma independente. Então, escolhi um autómato baseado nas características necessárias para a compatibilidade do sistema, que ronda os novecentos euros.

O valor total das eletroválvulas e do autómato ronda os cinco mil euros. Mais os componentes de baixo custo, os totais não ultrapassariam os seis mil euros. Portanto, o aproveitamento dos sistemas a bordo tornam possíveis, hipotéticas poupanças que, comparados aos duzentos mil euros, atingem patamares dos noventa por cento de poupança, não contabilizando com a mão-de-obra, caso seja aplicável.

7. PROVAS NO TANQUE

7.2. Objetivo

As provas têm por objetivo aferir e estudar o funcionamento do sistema de afundamento concebido. Têm lugar no tanque do laboratório de arquitetura naval da EN como é representada na imagem seguinte.



Figura 32 – Tanque de testes da EN

De forma a comprovar o estudo teórico feito na construção deste sistema, não podiam deixar de estar presentes os ensaios práticos. O *software* de programação do autómato permite fazer uma simulação da resposta do programa, variando a atuação dos sensores. Mas, só a simulação, é claramente insuficiente, por não incorporar a forma de como influenciarão os fatores externos, como o escoamento da água pelas válvulas, e a pequena ondulação que pode ocorrer durante o processo. Estas condições incidem diretamente em fatores, como, por exemplo, o tempo de afundamento. Com o modelo pronto e pesos disponíveis por forma a desequilibrar e lastrar o batelão, procedi às experiências, de forma a abranger desequilíbrios à proa, popa, a bombordo, estibordo, e uma combinação de dois eixos, nomeadamente transversal e longitudinal. Os subcapítulos seguintes são dedicados ao estudo do processo prático.

7.3. Tipos de provas e execução

As provas são baseadas em seis formas de desequilíbrios iniciais, por forma a analisar o comportamento do sistema, e manter a horizontalidade ao longo do afundamento. Seguidamente, mostro a forma gráfica de como pretendo executar os testes:

1) Condição inicial de caimento AR:

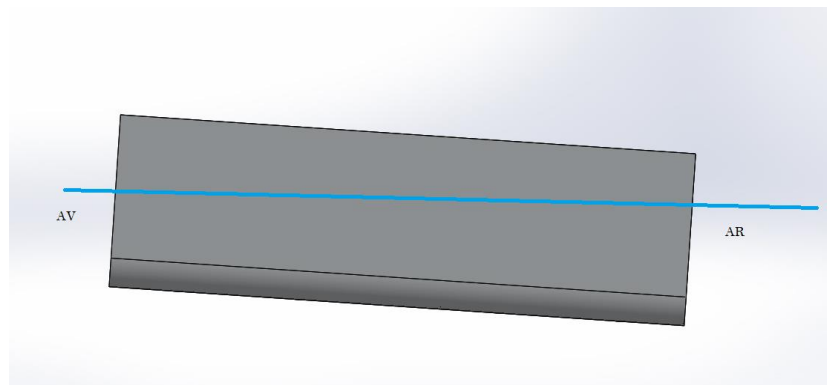


Figura 33 – Condição inicial: desequilíbrio AR

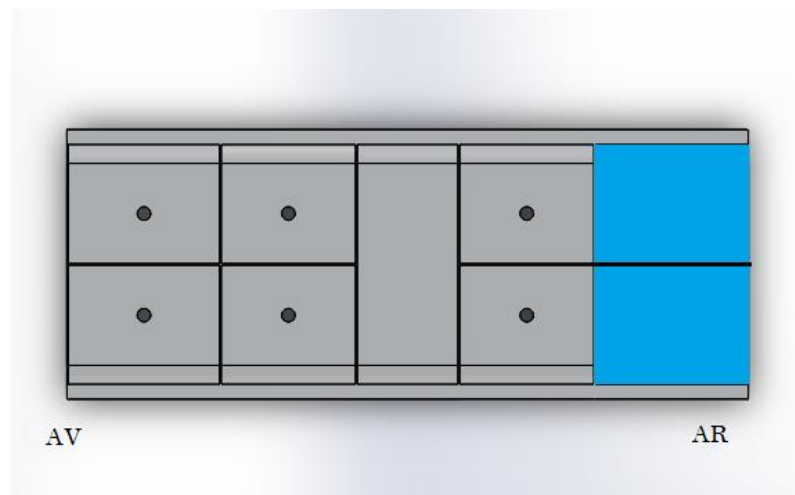
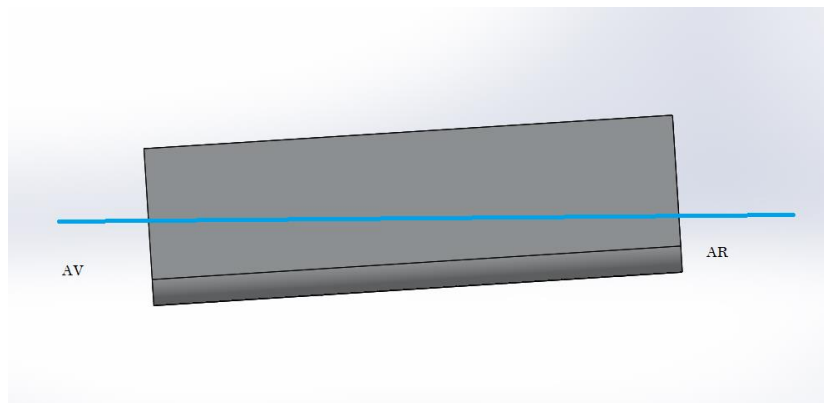
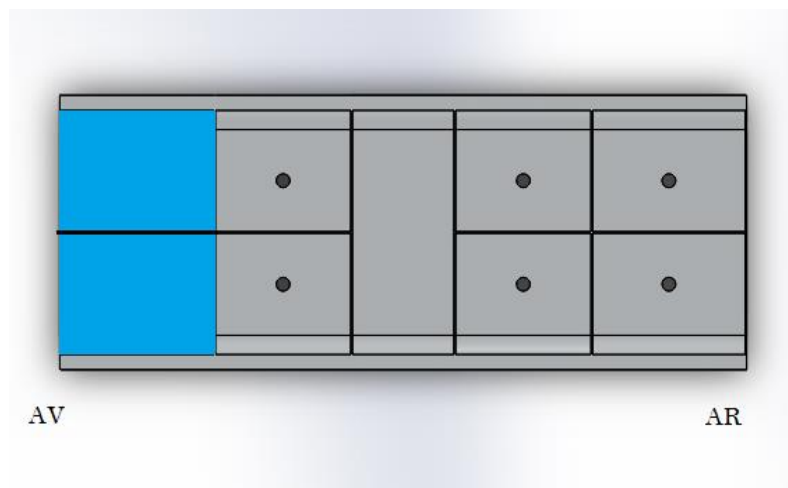
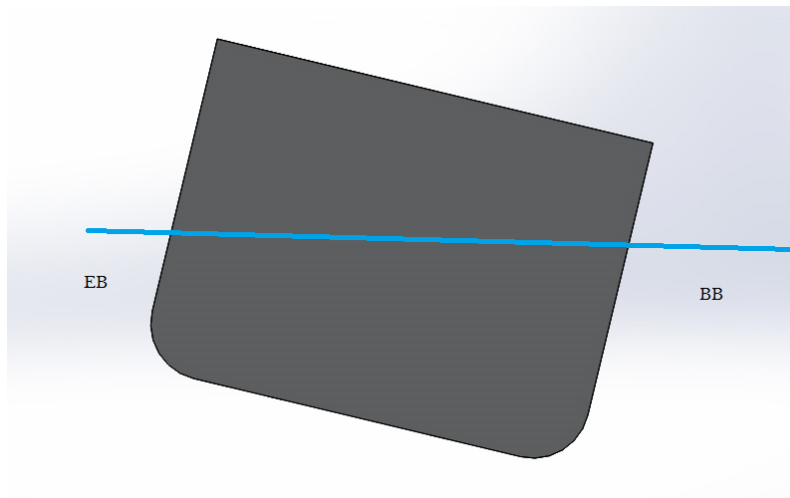
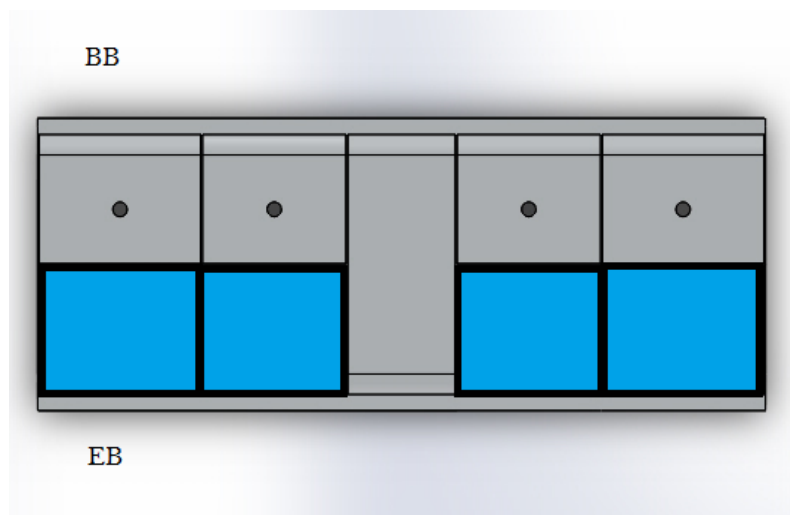


Figura 34 - Condição inicial: desequilíbrio AR (topo)

Para a execução nesta condição, o modelo será parcialmente cheio com água nos compartimentos AR, como representado nas figuras assinaladas com retângulos azuis. O objetivo deste desequilíbrio é verificar a resposta do sistema, perante a atuação do sensor colocado AR.

2) Condição inicial de caimento AV:*Figura 35 - Condição inicial: desequilíbrio AV**Figura 36 - Condição inicial: desequilíbrio AV (topo)*

Para a execução nesta condição, o modelo será parcialmente cheio com água nos compartimentos AV, representado nas figuras trinta e cinco e trinta e seis. O objetivo deste desequilíbrio é verificar a resposta do sistema, perante a atuação do sensor colocado AV.

3) Condição inicial de adorno a BB:*Figura 37 - Condição inicial: desequilíbrio a BB**Figura 38 - Condição inicial: desequilíbrio a BB (topo)*

O desequilíbrio para adornamentos difere ligeiramente. Terei de inundar todos os compartimentos do bordo para onde quero desequilibrar, para que o afundamento seja mais homogéneo. Neste caso, testo a atuação do sensor de bombordo, ao fechar estas válvulas.

4) Condição inicial de adornamento a EB:

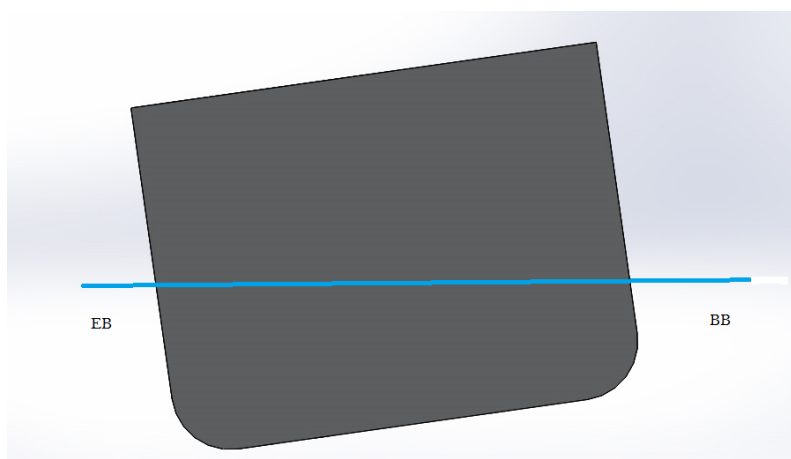


Figura 39 - Condição inicial: desequilíbrio a EB

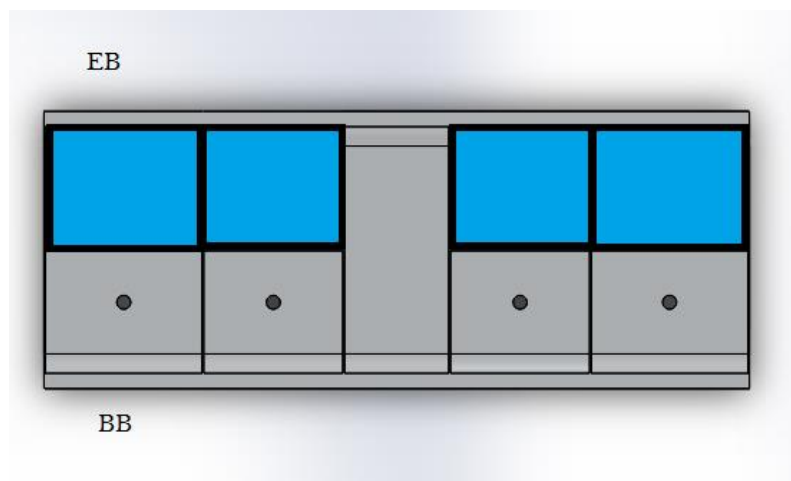


Figura 40 - Condição inicial: desequilíbrio a EB (topo)

À semelhança do caso anterior, esta prova testa a reação do sistema, à influência do sensor de EB.

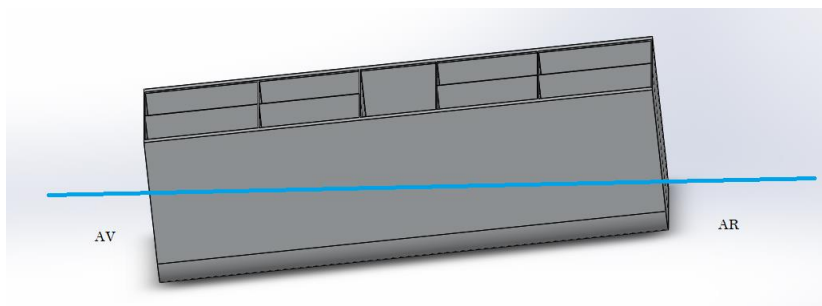
5) Condição inicial de adornamento e caimento combinado (AV+BB):

Figura 41 - Condição inicial: desequilíbrio combinado AV+BB

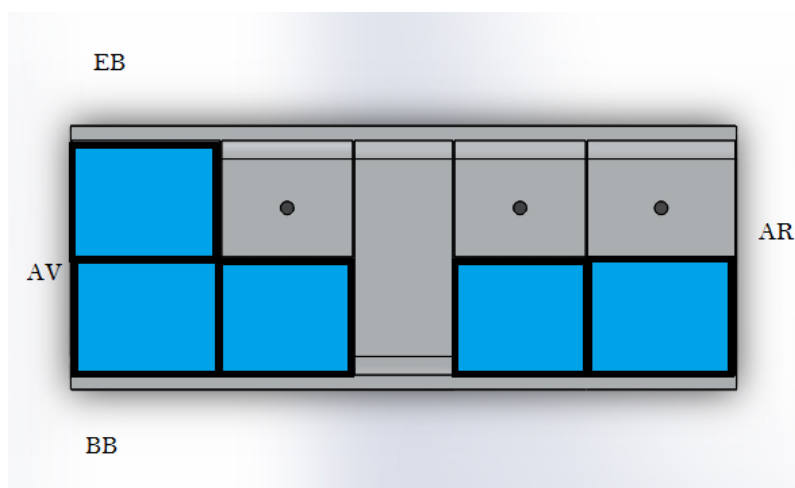


Figura 42 - Condição inicial: desequilíbrio combinado AV+BB (topo)

6) Condição inicial de adornamento e caimento combinado (AR+EB):

Existem quatro combinações para o adornamento combinado, que são: AV+BB; AV+EB; AR+BB; AR+EB. Se garantirmos que os sensores funcionam quando atuados sozinhos, garanto o seu funcionamento simultâneo, pela simulação do programa. Então, para verificar o comportamento do sistema na água, optei por efetuar duas combinações, que são as do ponto 5) e ponto 6). Estas duas experiências são suficientes para a verificação da atuação simultânea. Pois, o meu objetivo é, acima de tudo, garantir que o sistema coloca o batelão na horizontalidade, antes de entrar completamente na água.

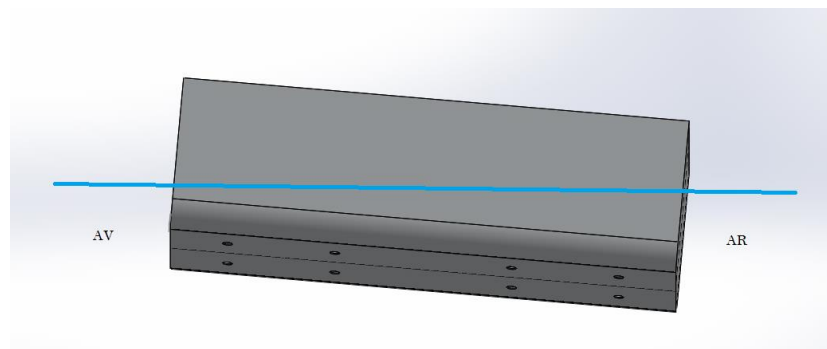


Figura 43 - Condição inicial: desequilíbrio combinado AR+EB

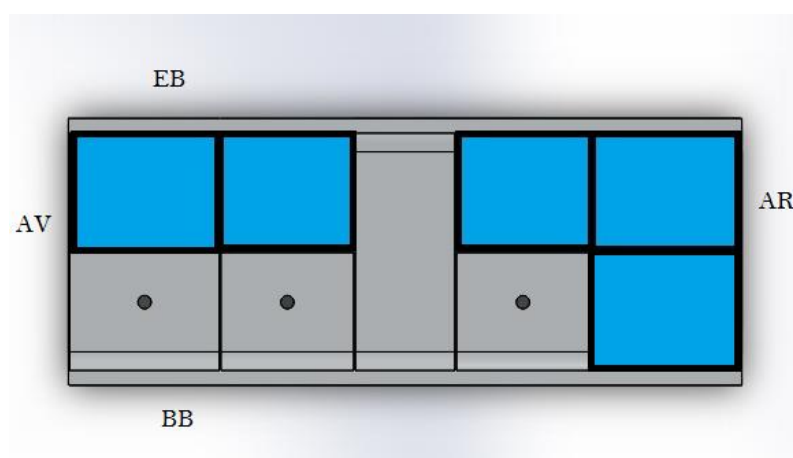


Figura 44 - Condição inicial: desequilíbrio combinado AR+EB (topo)

7.4. Dados obtidos¹⁴

Para a realização das experiências e para eventuais trabalhos futuros, torna-se necessário conhecermos alguns pontos de referência. Inicialmente, para a condição de carregamento inicial do batelão, é importante determinar a altura metacêntrica. Para o cálculo deste ponto, recorri à “teoria da experiência de inclinação”. Este método é baseado em condições requeridas para o equilíbrio numa posição inclinada, e é dada pela seguinte equação:

$$\Delta \overline{GM} \tan \phi = wt \text{ (GILLMER, 1972)}$$

¹⁴ Os cálculos efetuados encontram-se em tabelas Excel anexadas em suporte informático.

Para que possuísse as ferramentas necessárias para a execução do teste, coloquei um pêndulo no batelão, com uma graduação em angular, de modo a que fosse possível fazer leituras dos ângulos ao longo das inclinações, como é observável na figura quarenta e cinco.

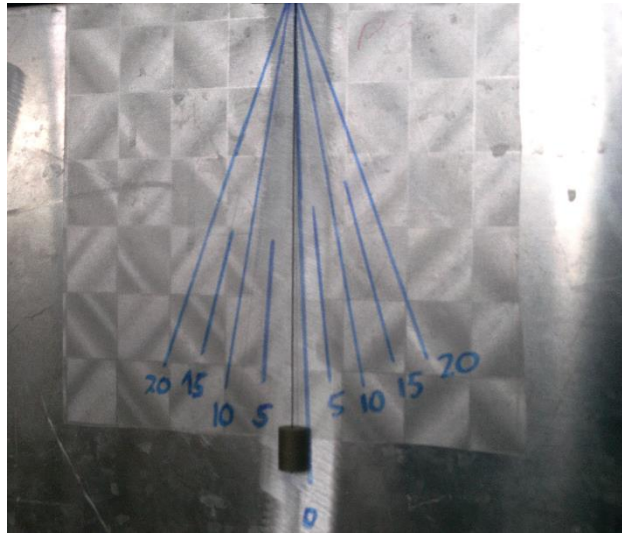


Figura 45 – Pêndulo colocado para a execução da leitura de ângulos

O movimento do pêndulo mede os ângulos de inclinação (Φ). A partir dos valores de w e \bar{y} , aplicados na expressão, determinamos a altura metacêntrica. Normalmente, efetuam-se várias inclinações, para os dois bordos. Para inclinações inferiores a dez graus, construo um gráfico das tangentes em relação aos momentos criados pelo peso de teste, para os dois bordos, e daí concluir que, para o caso das pequenas inclinações, o gráfico será forçosamente uma linha reta. Caso contrário, indicia falhas na execução da experiência. Com este gráfico, retiro, também, outra relação na expressão:

$$\Delta \overline{GM} \tan \phi = wt = \frac{1}{\text{declive}} \quad (\text{GILLMER, 1972})$$

Assim, para o meu teste, calculei três pontos distintos para a colocação da massa. Desses pontos, a altura metacêntrica será um valor médio das três medições obtidas, um valor médio dos valores médios de cada bordo, resultando numa altura metacêntrica estimada:

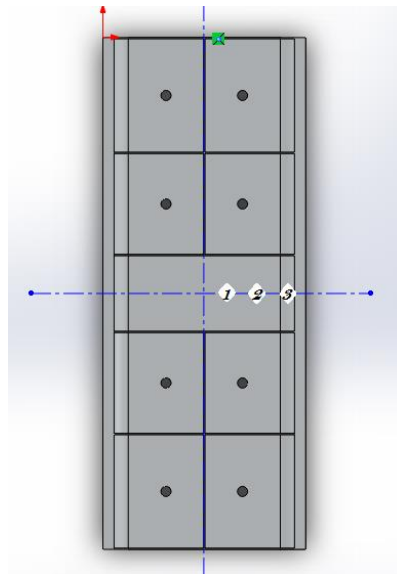


Figura 46 – Pontos de colocação do peso: 1) 6 cm; 2) 12 cm; 3) 18 cm

Efetuei os registos dos ângulos obtidos, com base nos cálculos efetuados, nas tabelas seguintes:

<i>Cálculo do deslocamento</i>	
<i>Massas</i>	Valor (Kg)
<i>Batelão</i>	17,95
<i>Inclinante</i>	2,25
<i>Lastro 1</i>	8,5
<i>Lastro 2</i>	8,5

Tabela 4 – Massas totais no batelão

<i>Leituras (graus)</i>	
BB	EB
4	5
7	8
9	10

Tabela 5 – Leituras obtidas a partir do pêndulo

<i>Posição da massa, com base na figura 39</i>	Δ_{total} (Kg)	$Tan(\varphi)$	w (Kg)	t (cm)	φ (°)	GM (cm)	
1	34,95	0,069927	2,25	6	0,069813	5,523863	BB
2	34,95	0,122785	2,25	12	0,122173	6,29177	
3	34,95	0,158384	2,25	18	0,15708	7,316364	
1	34,95	0,087489	2,25	6	0,087266	4,415042	EB
2	34,95	0,140541	2,25	12	0,139626	5,496852	
3	34,95	0,176327	2,25	18	0,174533	6,571872	

Tabela 6 – Tabela resumo dos dados para o cálculo final

Note-se que os ângulos de adornamento não são iguais para os dois bordos. Este facto levou com que repetisse a experiência, obtendo sempre resultado similares. O batelão inicialmente está na posição direita e a distribuição de pesos era simétrica. Este facto deve-se à imperfeição na distribuição interna de pesos.

Para a construção dos gráficos, foram calculados os momentos, sendo a distância transversal, que separa o peso de teste da linha centro, vezes a massa de teste. Foram retiradas da tabela seis a coluna das tangentes dos ângulos obtidos:

<i>Momentos (Kg.cm)</i>	<i>Tan ϕ</i>
13,5	0,069927
27	0,122785
40,5	0,158384
13,5	0,087489
27	0,140541
40,5	0,176327

Tabela 7 – Tabela de momentos e tangentes para construção de gráfico

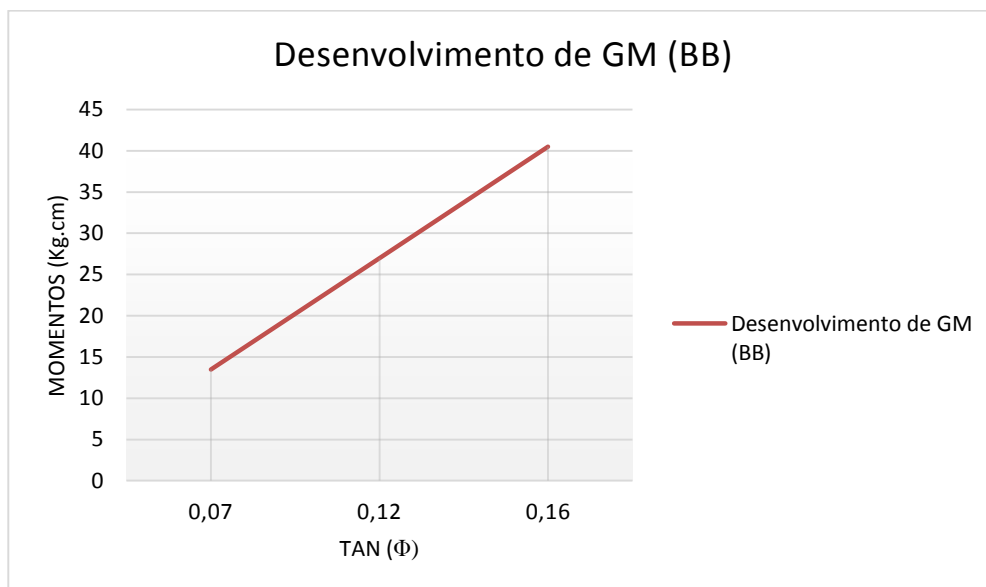


Gráfico 1 – Desenvolvimento da altura metacêntrica para inclinações a BB

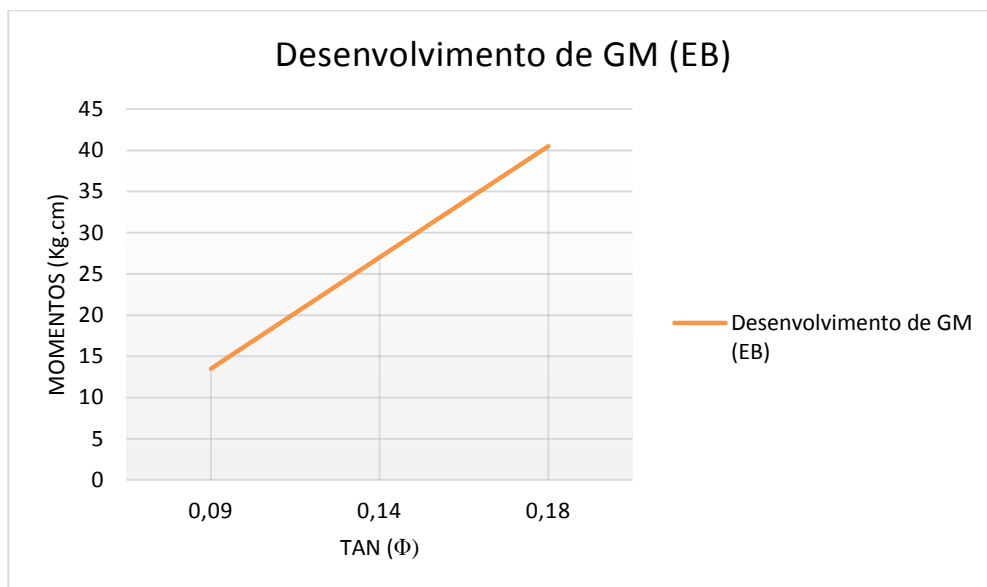


Gráfico 2 - Desenvolvimento da altura metacêntrica para inclinações a EB

Com base nos gráficos é visível que são efetivamente retas, um indício de que os valores obtidos são coerentes. Com os declives destas retas, poderia encontrar outra relação na expressão, como já demonstrado.

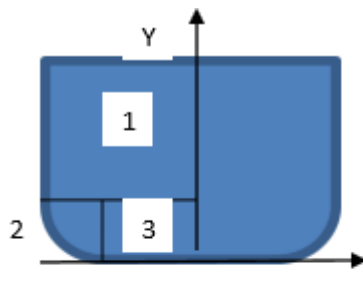
Concluindo, obtemos o valor final para a altura metacêntrica:

		<i>GM (cm) final</i>
6,2917698	BB	5,89
5,4968521	EB	

Tabela 8 - Cálculos das médias resultantes da altura metacêntrica e resultado final

Com os dados que acabei de obter, é possível, e seria interessante, saber a posição do centro de gravidade, definindo os pontos de referência no batelão. Para o cálculo da posição do centro de gravidade, na condição de carregamento imediatamente antes do processo de afundamento ter início, é necessário conhecermos a posição de alguns pontos, tais como: a altura do metacentro KM, e a posição do centro de gravidade inicial do batelão, ou seja, quando o batelão não continha nenhum componente montado e lastro.

Iniciei o cálculo decompondo a secção transversal do batelão em figuras geométricas conhecidas, determinando a posição do centro de gravidade de cada um. No final, determinei a posição do centro de gravidade da figura transversal, como posso demonstrar nas relações matemáticas seguintes:



$$Yg \left(\frac{1}{4} \text{ de círculo} \right) = \frac{4 \times R}{3\pi}$$

Figura 1: $Yg = 17,5 \text{ cm}$, $\text{Area} = 25 \times 20 = 500 \text{ cm}^2$

Figura 2: $Yg = 5 - \frac{4 \times 5}{3\pi} = 2,88 \text{ cm}$, $\text{Area} = 19,63 \text{ cm}^2$

Figura 3: $Yg = 2,5 \text{ cm}$, $\text{Área} = 15 \times 5 = 75 \text{ cm}^2$

$$Yg \text{ (total)} = \frac{\sum Yg \cdot A}{\sum A}$$

$$Yg \text{ (total)} = \frac{2,88 \times 19,63 + 2,5 \times 75 + 17,5 \times 500}{19,63 + 75 + 500} = 15,155 \text{ cm}$$

O batelão é uma estrutura simétrica, seja transversal ou longitudinalmente. Portanto, das três coordenadas (X,Y,Z), a única que não coincide com o centro geométrico será a altura (Y). A partir dos dados obtidos, construí uma tabela das posições do centro de gravidade de cada chapa constituinte do batelão:




<i>Posição do centro de gravidade do batelão (Alumínio)</i>						
<i>Item</i>	<i>Área (m2)</i>	<i>Xg (cm)</i>	<i>Yg (cm)</i>	<i>Zg (cm)</i>	<i>Geometria</i>	<i>Quantidade</i>
Antepara do casco	1	50	50	0,1		1
Anteparas transversais	0,0153	40	15,125	0,1		6
Anteparas longitudinais	0,1275	21,25	15	0,1		2

Tabela 9 – Posição do centro de gravidade de cada chapa que constitui o batelão



Para o cálculo da nova posição do centro de gravidade considero o peso dos componentes e do lastro adicionados:

<i>Componente</i>	<i>Massa (kg)</i>	<i>Yg (cm)</i>
Eletroválvulas	0,424	2
Autômato	0,28	25
Sensores	0,02	30
Bateria	3	10
Cablagem	Desprezável	
Lastro1	8,5	2,5
Lastro2	8,5	5

Tabela 10 – Massas adicionadas ao batelão

Para uma distribuição de pesos metodicamente rigorosa, tenho de considerar, tanto em (Xg) como em (Zg), as posições das massas adicionadas. No entanto, por questões de simplificação, defini que só consideraria as alturas dos pesos colocados simetricamente em relação ao centro de gravidade, que são os casos dos sensores, das válvulas, do lastro e da bateria. O autômato é o único componente que se encontra posicionado, sem nenhuma relação simétrica. Ainda assim, só considerarei efeitos na altura do centro de gravidade.

Com base no método da adição do peso, calculo a nova posição para o centro de gravidade:

$$KG_1 = \frac{\Delta \overline{KG} + w \overline{Kg}}{\Delta_1} \text{ (GILLMER, 1972)}$$

$$KG_1 = \frac{17,9 \times 15,2 + 0,42 \times 2 + 0,28 \times 25 + 0,02 \times 30 + 3 \times 10 + 8,5 \times 2,5 + 8,5 \times 5}{17,9 + 0,42 + 0,28 + 0,02 + 3 + 8,5 + 8,5}$$

$$KG_1 = 9,69 \text{ cm}$$

Posso verificar, com os dados obtidos, que houve uma descida da posição do centro de gravidade de aproximadamente cinco centímetros. Deve-se, em grande parte, à colocação de lastro, num total de vinte quilogramas, abaixo do centro de gravidade.

Concluindo, defino perfeitamente o modelo com as seguintes características:

<i>Condição para afundamento</i>		
<i>GMt (cm)</i>	<i>KG (cm)</i>	<i>KM (cm)</i>
5,89	9,69	14,99

Tabela 11 – Resumo dos pontos de referência do batelão



Executei as provas indicadas no subcapítulo 7.2, com as seguintes observações: de todos os desequilíbrios propostos, consegui sempre que o batelão atingisse a horizontalidade, antes de entrar totalmente na água. A característica que, claramente, varia mais em todos, vai ser o tempo de afundamento. Tais variações têm uma amplitude de aproximadamente dois minutos. Os afundamentos mais lentos são, os que possuem o desequilíbrio para AV, ou para AR, totalizando um tempo de aproximadamente dez minutos. São os mais morosos, pelo facto de possuírem menos água nos compartimentos, para criar o desequilíbrio inicial. Portanto torna-se necessário o embarque de mais água para inundar o modelo.

As provas de paragem do sistema em determinados pontos do afundamento, têm um comportamento que seria expetável. O sistema fecha todas as válvulas, e o batelão fica a flutuar numa posição estática, sem progressão do afundamento.

7.5. Análise parcial de resultados

Para a análise dos resultados dos testes ao sistema, efetuei vídeos para cada condição de desequilíbrio, tirando conclusões mediante o visionamento destes. Nas provas iniciais ao sistema, deparei-me com algumas dificuldades, todas elas com origem nos sensores de inclinação.

Quando comecei por fazer os primeiros testes, o sistema executava a correção com atrasos, ou seja, nunca chegava a atingir a posição horizontal ao longo do processo, entrando na água sempre muito inclinado. Este comportamento deveu-se ao modo como estavam montados os sensores. Estes componentes são mecânicos e, acionados pelo movimento de uma esfera, como já foi abordado anteriormente. São configurados de fábrica para uma montagem horizontal. Montados desta forma, detetam inclinações a partir dos dez graus. Este valor é aceitável para adornamentos. Já para caimentos é excessivo. Para contornar esta dificuldade, montei suportes de acrílico, que tornavam possíveis a regulação dos sensores em inclinação como é observável em Anexo C. Com esta montagem, coloquei os sensores mais próximos da deteção da inclinação. Ou seja, ficaram montados com uma inclinação mais fechada. Esta configuração conferiu maior sensibilidade ao sistema, detetando estar em inclinação a partir de valores próximos dos dois a três graus. Esta adaptação evidenciou a maior frequência com que o sistema executa correções, que é audível pela abertura e fecho de válvulas. Assim, com esta configuração, o modelo passou a entrar na água sempre na horizontal, por aumento da frequência de abertura e fecho de válvulas.



Todas as condições de equilíbrio testadas funcionaram com sucesso. O sistema autocorriga a posição independentemente do eixo, ou uma combinação destes, para o qual está desequilibrado, como descrito nos desequilíbrios combinados.



8. ANÁLISE GLOBAL, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Ao longo do trabalho desenvolvido, abordei inicialmente os conceitos teóricos, que permitem a avaliação científica. Do desenvolvimento do processo de afundamento. Esta revisão teórica foi fundamental na sustentação do trabalho prático, e validação das experiências que fui elaborando. Desde cedo, tinha em mente a construção de um modelo de testes, em que tive naturalmente que conciliar com estágios no âmbito da formação de um Aspirante da Escola Naval, com a redação da própria tese, que desde cedo iniciei como sendo parte de um processo dinâmico e contínuo, e com as questões do cotidiano, a que todos estamos sujeitos. Esta dissertação sendo técnica abrange os mais variados temas ligados à engenharia. Não só da minha área curricular, mas também áreas como a programação, eletrônica e eletricidade. Esta inevitável convergência, só vem confirmar aquilo que tem acontecido ao longo dos tempos, em que a mecânica, eletricidade e eletrônica estão cada vez mais dependentes entre si, para a construção de um equipamento. Longe vai o tempo em que os equipamentos mecânicos eram exclusivamente de construção e operação mecânica.

Embora tenham ocorrido constrangimentos, foi possível desenvolver em tempo útil, a maioria dos assuntos que haviam sido propostos, gostaria de ter efetuado um estudo mais aprofundado, do comportamento do sistema, para vários tipos de casco, garantindo assim a abrangência do seu funcionamento aplicável a qualquer tipo de estrutura flutuante.

Em relação ao desenvolvimento da dissertação existiram, algumas adaptações, que tive de efetuar, e dificuldades, que ocorreram relativamente ao plano original, nomeadamente:

- O modo de acionamento: estava previsto usar uma placa recetora e um transmissor AM, que revelou ser uma péssima escolha, devido à instabilidade do sinal e interferência. O autómato possui especificações de tensão nos sinais elétricos de entrada. Sem esta estabilização, a paragem e a execução do processo estava ao critério do ambiente circundante. Portanto, optei por um interruptor, que executa a mesma função de um modo muito mais robusto.
- Especificação das válvulas: devido ao diferencial de pressão. Estavam montadas válvulas com uma pressão mínima de funcionamento de 0,2 bar. Foi necessário adquirir outras, com uma pressão mínima de funcionamento partindo de zero bar.



- As conexões elétricas com origem de uma só fonte: foi complicado fazer estas ligações, até entender que teria de separar o circuito de alimentação do autómato do circuito de trabalho, porque o fecho de válvulas desalimenta o autómato, o que significa que assim estabelecia o arranque do processo, ao primeiro comando do autómato criava uma falha na alimentação;
- A garantia da estanqueidade no compartimento estanque: por vezes infiltrava-se água pela entrada dos fios elétricos, mas o sistema nunca deixou de funcionar, devido à robustez do próprio autómato, daí a minha escolha por este equipamento. Garante-me uma margem para o erro e descuido elevada.

Estas foram as principais dificuldades, sentidas durante todo o trabalho, embora tenha conseguido sempre contornar as questões de uma maneira ou de outra, ou não fosse esta uma dissertação de engenharia.

Os trabalhos técnicos, que pretendem melhorar ou alterar um processo já implementado, são sempre sujeitos à mesma questão, própria dos dias de hoje: é mais barato ou não?

Ora, a resposta a esta pergunta não é linear, principalmente quando existe a tendência de quantificar o fator da segurança. O sistema, se aplicado num âmbito interno da Marinha revela poupanças, apenas porque os navios são da Marinha, a mão-de-obra não é um acréscimo ao orçamento, e grande parte dos componentes já se encontram a bordo. Caso contrário, certamente ficará mais caro que o método dos explosivos. Porque, para além de todo o processo de limpeza e preparação do navio, que é transversal aos dois métodos, existe ainda a componente de aquisição e montagem do sistema. O que simples explosivos resolvem de forma mais célere e talvez económica, principalmente, tratando-se de estruturas obsoletas.

Se quero apontar as grandes vantagens do sistema, podem ou não, ser económicas, dependendo do âmbito em que queremos aplicar como referi no parágrafo anterior. Então, este sistema é vantajoso, principalmente, devido à universalidade da sua aplicação. Não é destrutivo, e o fator da segurança é bastante superior ao método das explosões. Existe também a garantia, de colocarmos o navio no fundo na posição que pretendemos. Com a aplicação de redundâncias, e programação de segurança que, por exemplo, interrompe o



processo devido à falha de uma válvula, podemos torná-lo quase infalível. Esta é a grande vantagem, a universalidade de aplicações que podemos fazer, por ser não destrutivo e, por ser possível parar o processo em qualquer fase, até à perda de reserva de fluabilidade.

O sistema pode ser melhorado de vários ângulos, tendo em vista a realização de trabalhos futuros. Pode ser efetuada uma melhoria, principalmente, na área da criação de redundâncias e previsão de avarias possíveis, na alimentação a partir de várias fontes, ou a partir de uma, de modo a criar redundância na alimentação. No modo de configurar o sistema, caso falhe uma válvula; na aplicação em outras plataformas que não navios, devido à grande vantagem de conseguir parar o processo, como, por exemplo, plataformas *offshore* de exploração de recursos naturais, parques eólicos no mar, etc.

Proponho, também, que a forma do modelo experimental, seja uma reprodução fiel, à escala, de um navio, de modo a aferir a verdadeira correção que o sistema executa, implementando diferentes volumes de compartimentos, sendo, assim, possível extrapolar, por meio da similitude, os dados obtidos, para aplicação em casos reais de afundamento.

A parte da programação, também, é uma área extensa de desenvolvimento. O autómato é aplicado em tudo o que conhecemos. É uma área em grande expansão no que diz respeito à automação. Não é por acaso, que estes aparelhos são utilizados em processos industriais, muitos deles a operar em ambientes de agressivos, de temperatura e químicos. O estudo pormenorizado do funcionamento dos ciclos; o modo como a CPU faz a execução da leitura das entradas e saídas em ciclo, são áreas que ainda podem ser desenvolvidas no âmbito da automação e controlo de processos.

Posso afirmar que este sistema representa um elevado nível de controlo, segurança e automação no processo de afundamento, ao contrário do que acontece com a aplicação de explosivos. Não destrói a integridade da plataforma a afundar. Daí que a aplicação de explosivos está limitada a plataformas obsoletas, em que o dano mínimo à sua integridade não é relevante. Ora na aplicação, por exemplo, no sistema de lastro de uma turbina eólica é impensável. Por estes e outros motivos, é um sistema a considerar em afundamentos futuros, nomeadamente, se a Marinha entender aplicar no âmbito interno.



BIBLIOGRAFIA

CARVALHO, G. G. (22 de Dezembro de 2012). *Automação Criativa*. Obtido de <http://automacao-criativa.blogspot.pt/2012/07/apresentacoes-de-trabalhos.html>

ÇENGEL, Y. A., & CIMBALA, J. M. (2007). *Mecânica dos Fluidos - Fundamentos e Aplicações*. (K. A. ROQUE, & M. M. FECCHIO, Trans.) São Paulo, Brazil: McGraw - Hill.

DIREÇÃO DAS CONSTRUÇÕES NAVAIS. (25 de Fevereiro de 1972). *Curvas Hidrostáticas. Hydrostatic Curves*. Alfeite: Ministerio da Marinha.

DIREÇÃO DE NAVIOS. (1991). *Prova de Estabilidade (N.R.P. Afonso Cerqueira)*. Alfeite: Superintendência dos Serviços do Material.

FARIAS, B. V. (24 de Dezembro de 2012). *Equilíbrio de corpos flutuantes*. Obtido de http://www.oceanica.ufrj.br/ocean/cursosead/arqii2/nova_pagina_15.htm

FRANZINI, J. B., & FINNEMORE, E. J. (1982). *Fluid Mechanics*. Belfast: McGraw-Hill.

GATES, D. J., & LYNN, N. M. (1990). *Ships, Submarines and the Sea*. UK: Brassey's.

GILLMER, T. C. (1972). *Modern Ship Design*. Annapolis, Maryland, Estados Unidos da América: United States Naval Institute.

i Informação. (19 de dezembro de 2012). *Centros de mergulho defendem naufrágios propositados para dinamizar atividade*. Obtido de <http://www1.ionline.pt/conteudo/21702-centros-mergulho-defendem-naufragios-propositados-dinamizar-atividade>



Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores do Porto. (8 de junho de 2007). *Protet*.

Obtido de O que é um autómato?: <http://protet.inescporto.pt/o-que-e/automacao-industrial/o-que-e-um-automato.html>

MACHADO, N. (22 de Dezembro de 2012). *Aulas de física e química*. Obtido de http://www.aulas-fisica-quimica.com/9f_16.html

Ocean Revival. (19 de dezembro de 2012). *Ocean Revival*. Obtido de <http://www.oceanrevival.org/pt/projecto.html>

Pires, B. F. (2012). PORTIMÃO AFUNDA ARMADA. *Jornal Algarve* 123.

RAWSON, K. J., & TUPPER, E. C. (2001). *Basic Ship Theory* (5ª ed., Vol. 1). Woburn: Butterworth - Heinemann.

SÁ, N. (18 de fevereiro de 2010). *Amigos do dori*. Obtido de <http://amigosdodori.blogspot.pt/2010/02/movimento-para-preservacao-e-proteccao.html>

SIEMENS. (2005). *Manual LOGO!*

SNAME. (1988). *Principles of Naval Architecture Second Revision*. (E. V. Lewis, Ed.) New Jersey: The Society of naval Architects and Marine Engineers.

THE SNAME. (1939). *Principles of Naval Architecture* (Vol. I). (H. E. ROSSELL, & L. B. CHAPMAN, Edits.) New York: The Society of Naval Architects and Marine Engineers.

ANEXO A

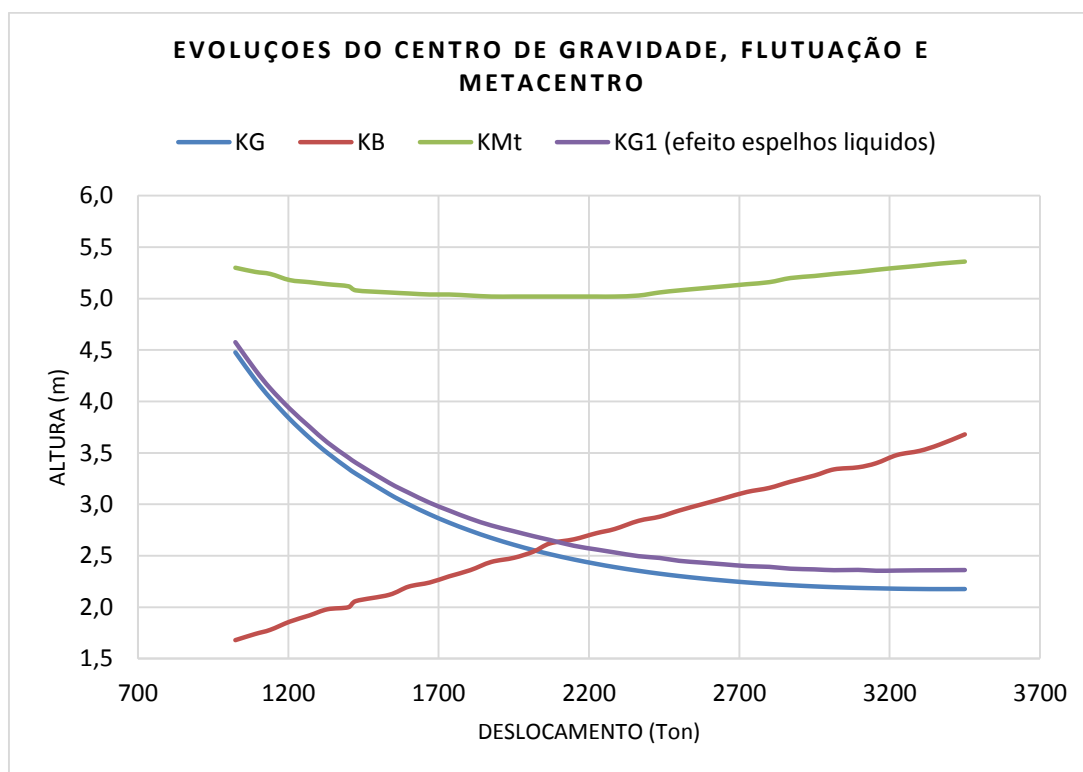


Gráfico 3 – Comportamento hidroestático da corveta (Obtido com base nas curvas hidroestáticas, DIREÇÃO DAS CONSTRUÇÕES NAVAIS, 1972. Cálculos em suporte informático em anexo)

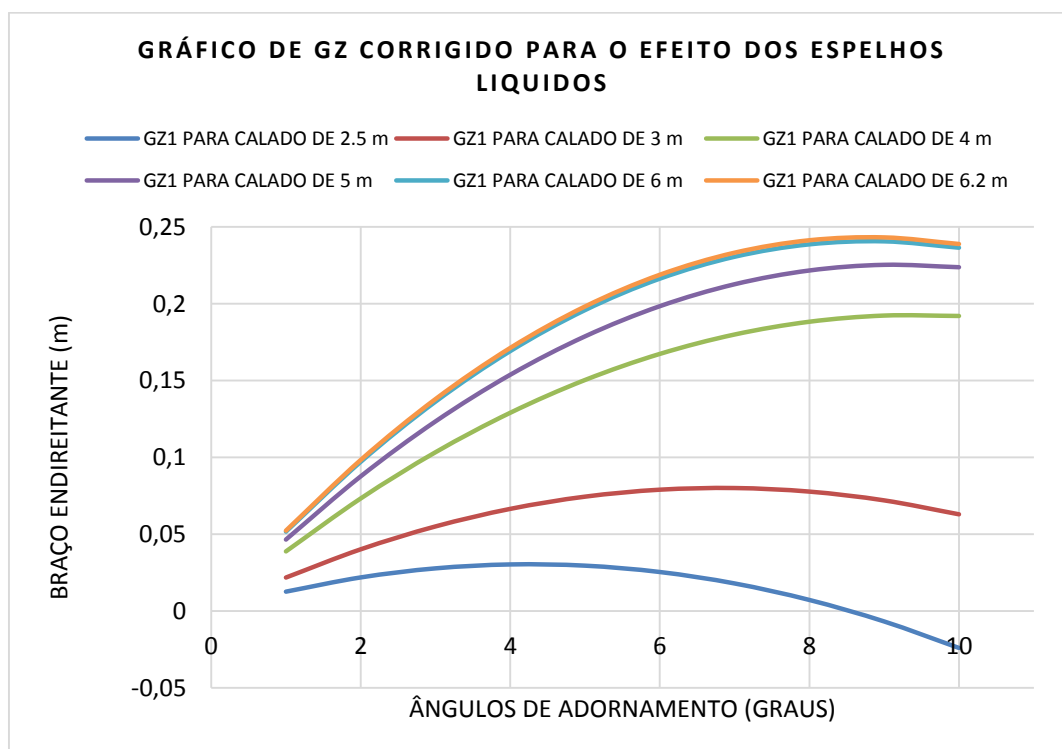
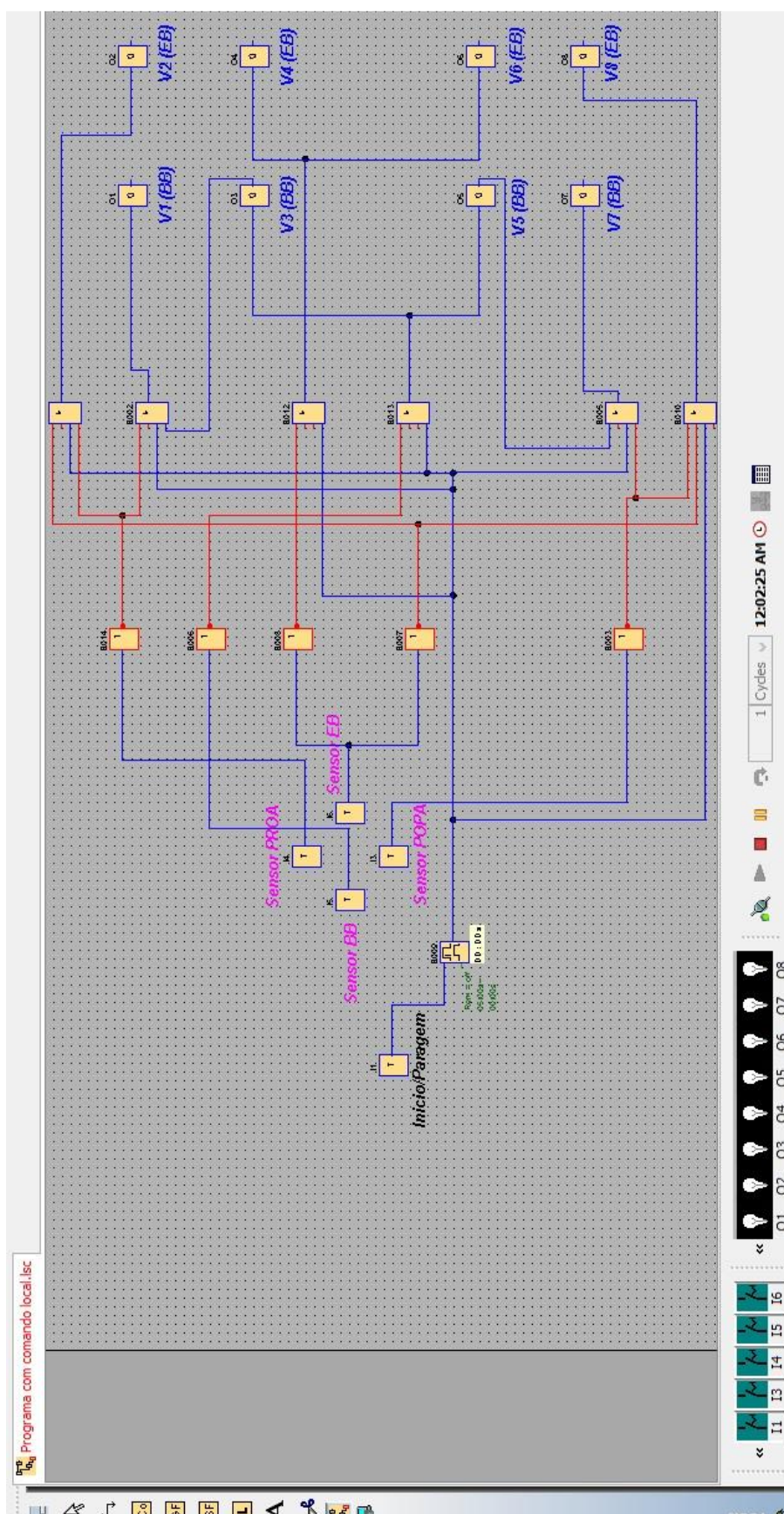
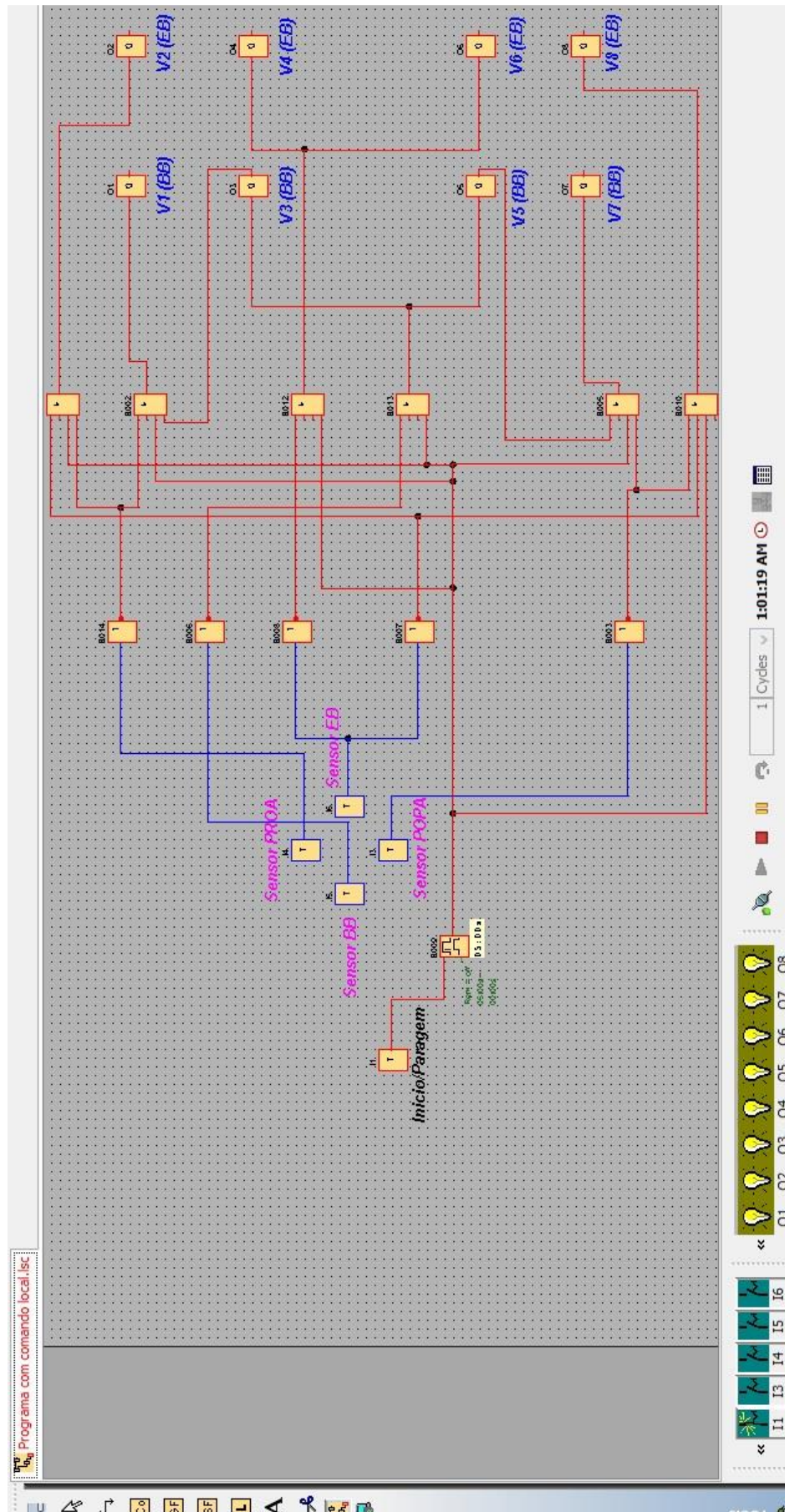


Gráfico 4 – Evolução do braço endireitante relativamente aos calados (Obtido com base nas curvas hidroestáticas, DIREÇÃO DAS CONSTRUÇÕES NAVAIS, 1972). Cálculos em suporte informático em anexo)

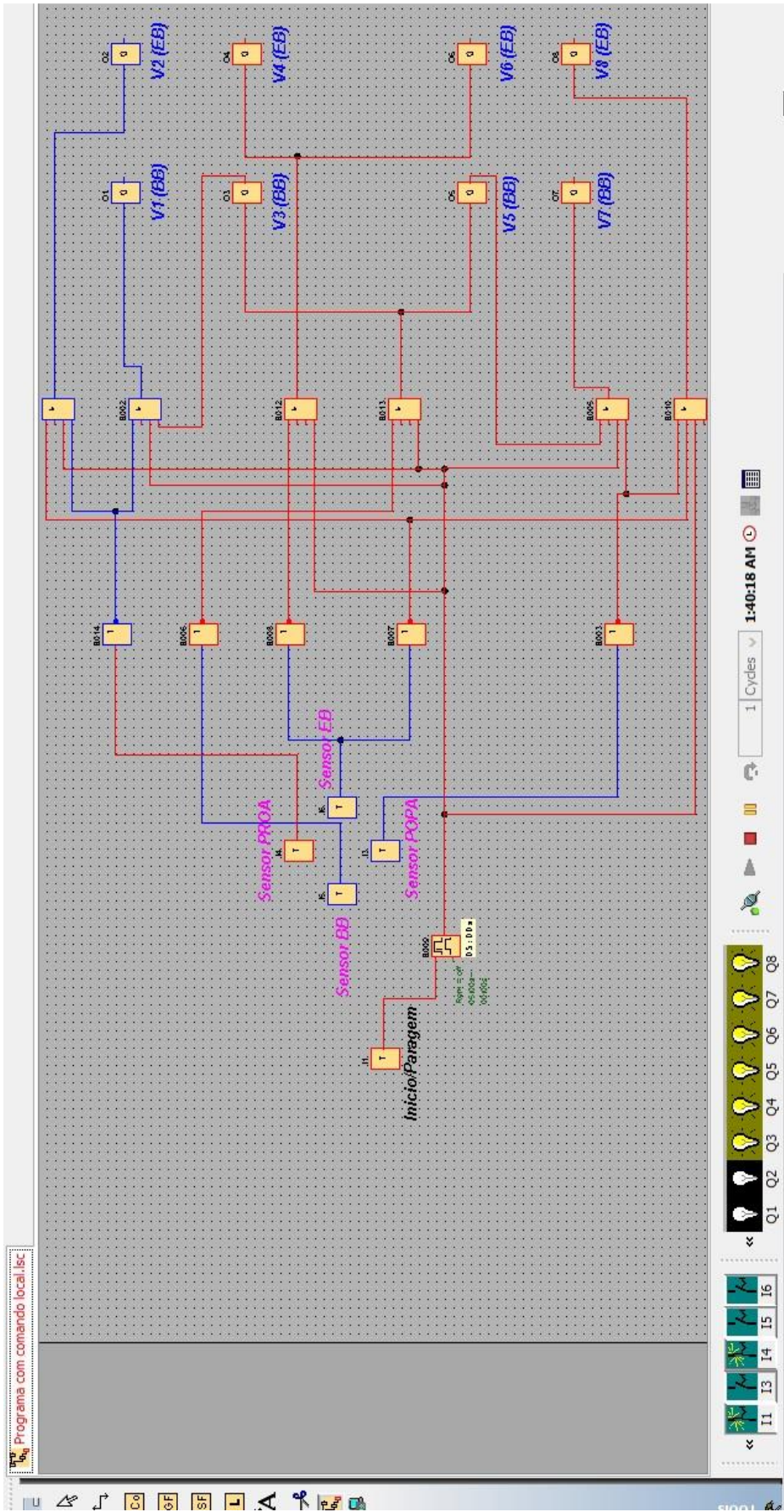
ANEXO B



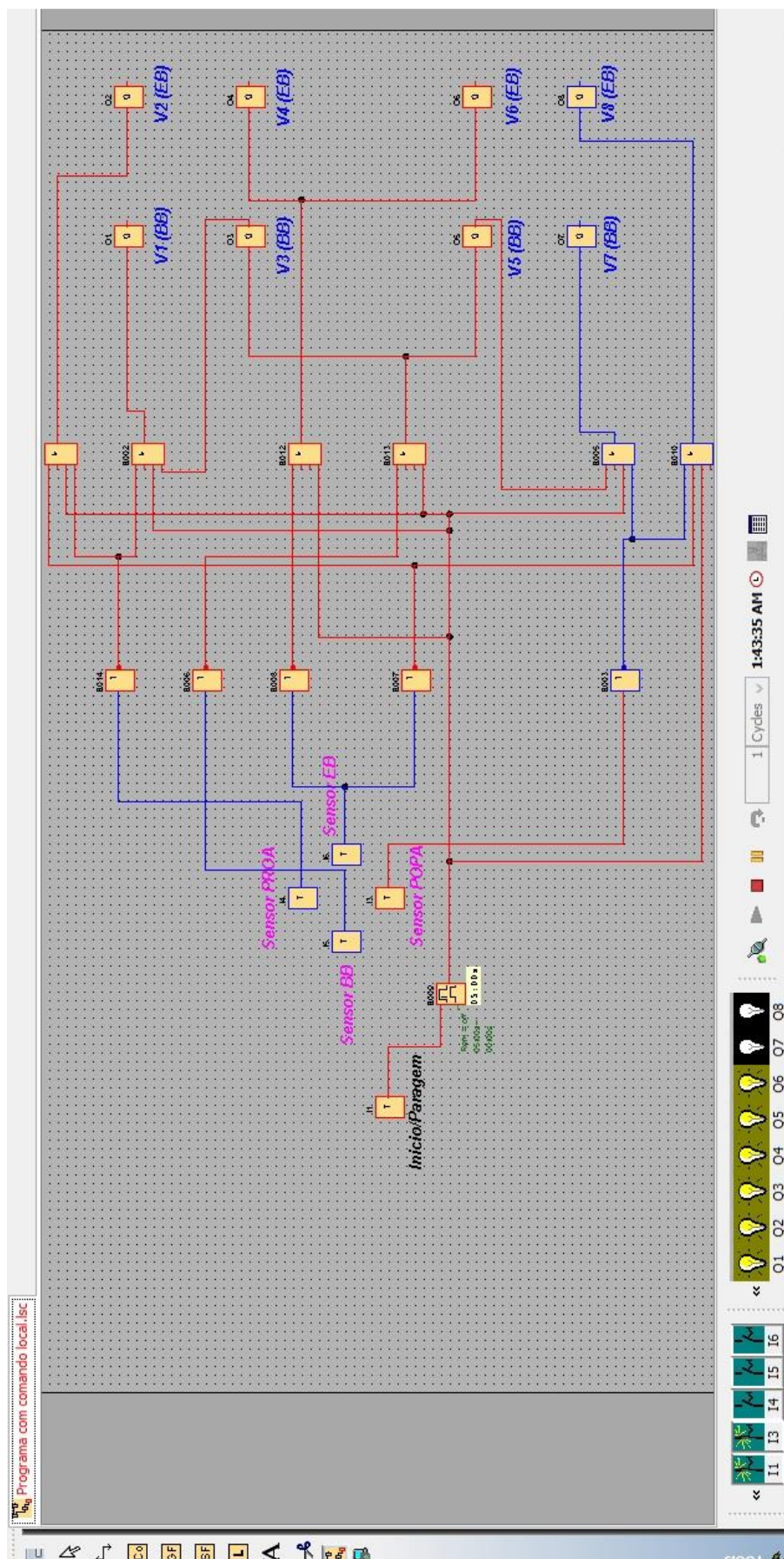
Esquema 1 - Esquema do programa, em ambiente de programação.



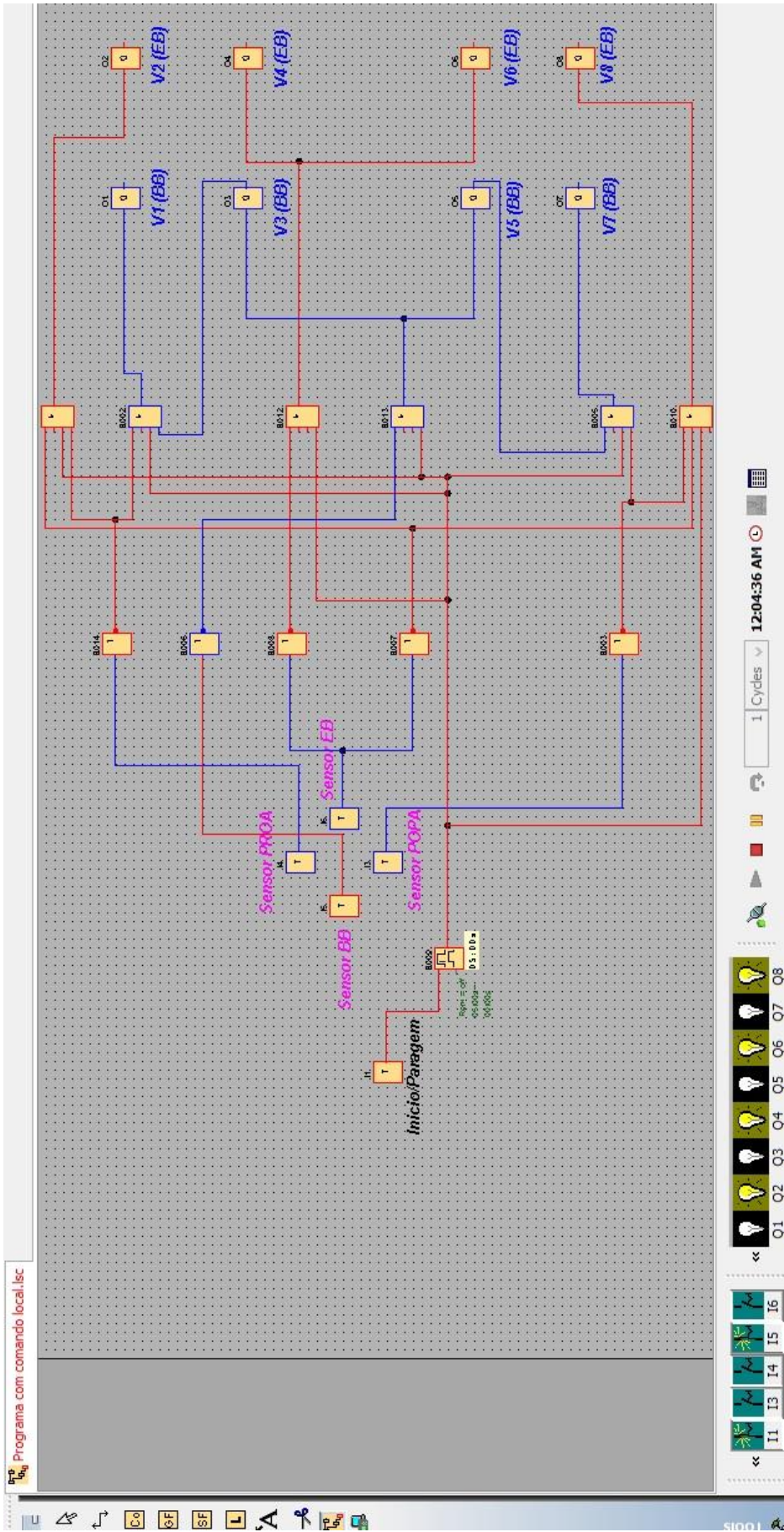
Esquema 2 – Totalidade das válvulas abertas, nenhum sensor atuado (afundamento horizontal)



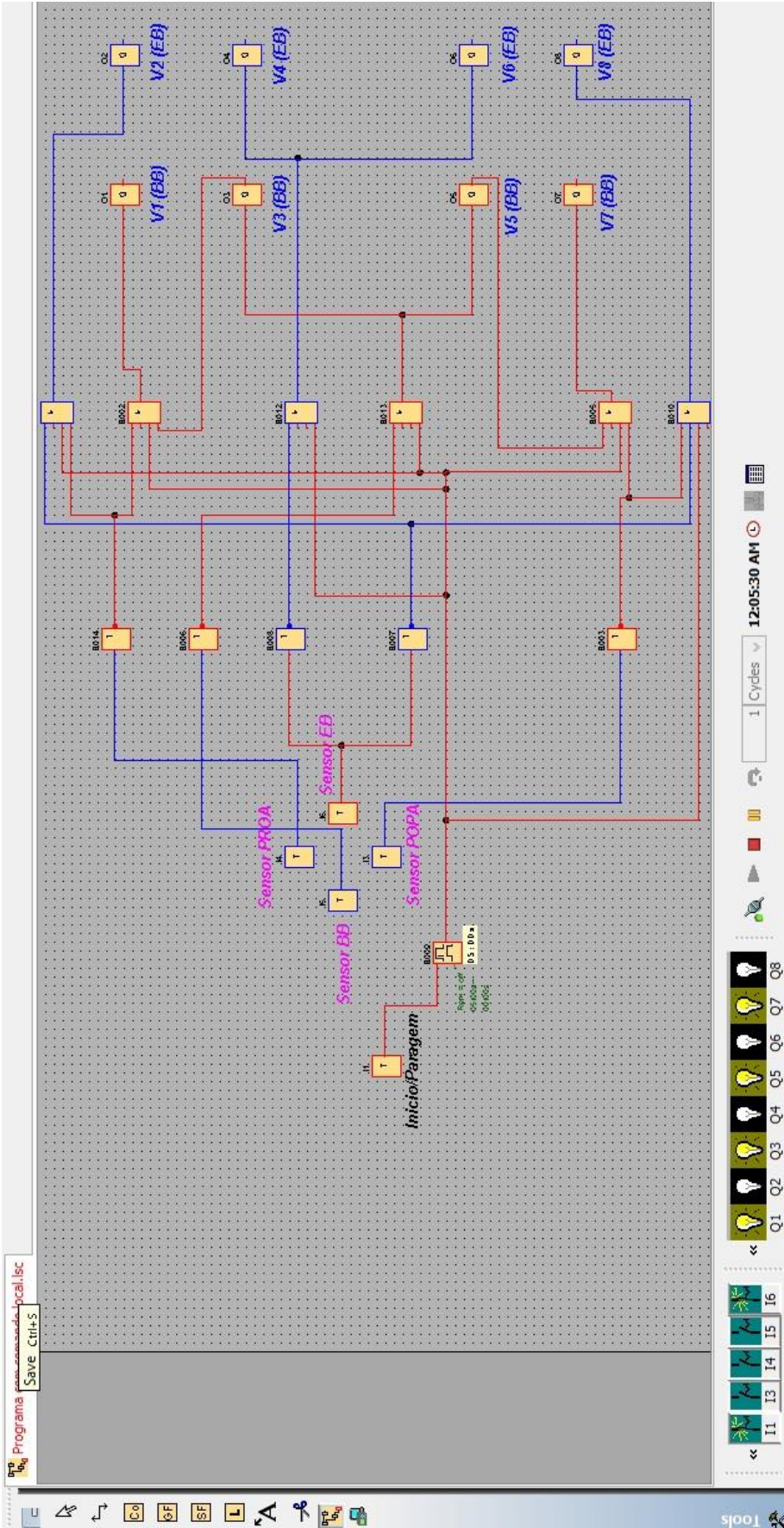
Esquema 3 - Resultado da atuação do sensor I2 (Proa)



Esquema 4 – Resultado da atuação do sensor de popa

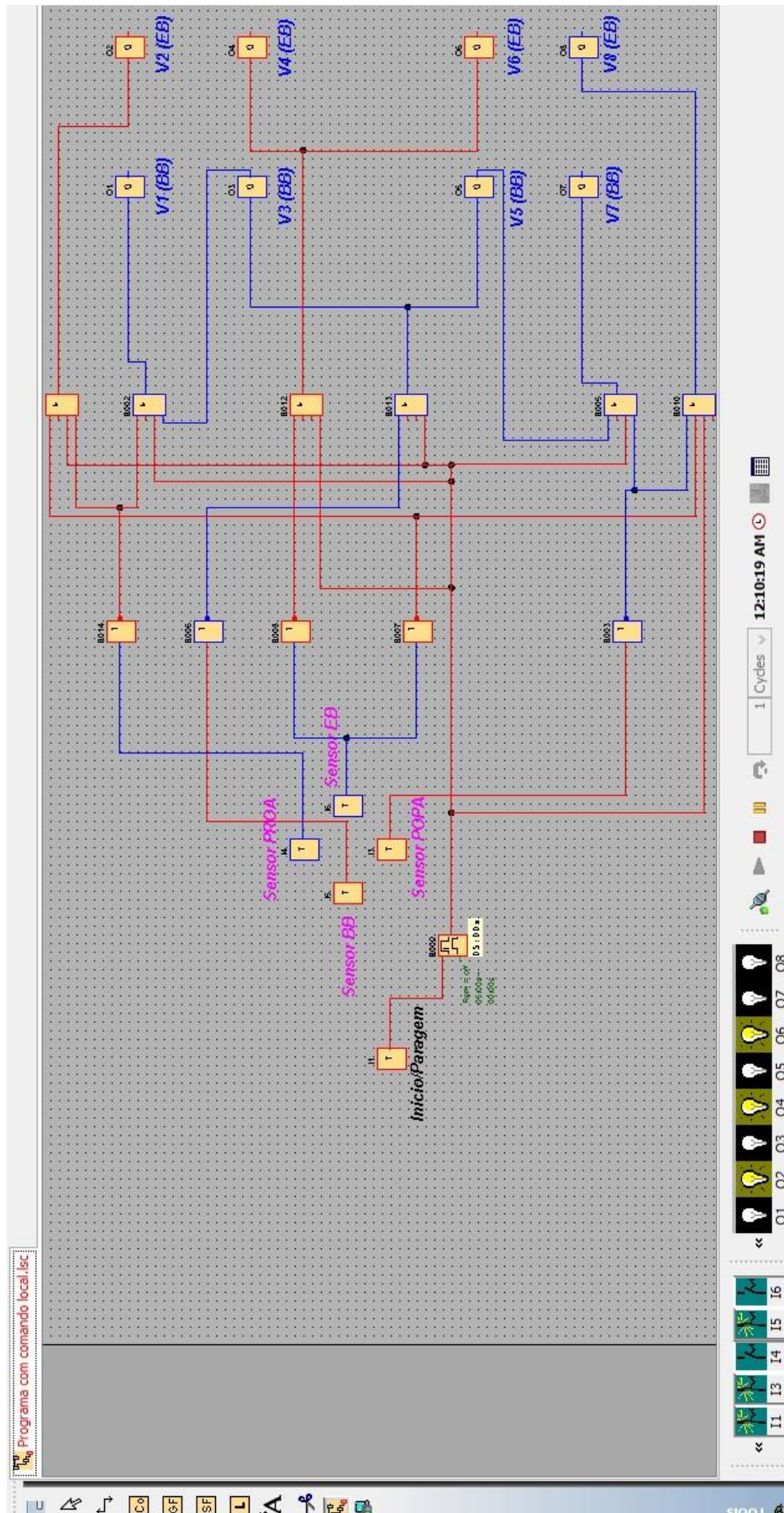


Esquema 5 – Resultado da atuação do sensor de Bombordo

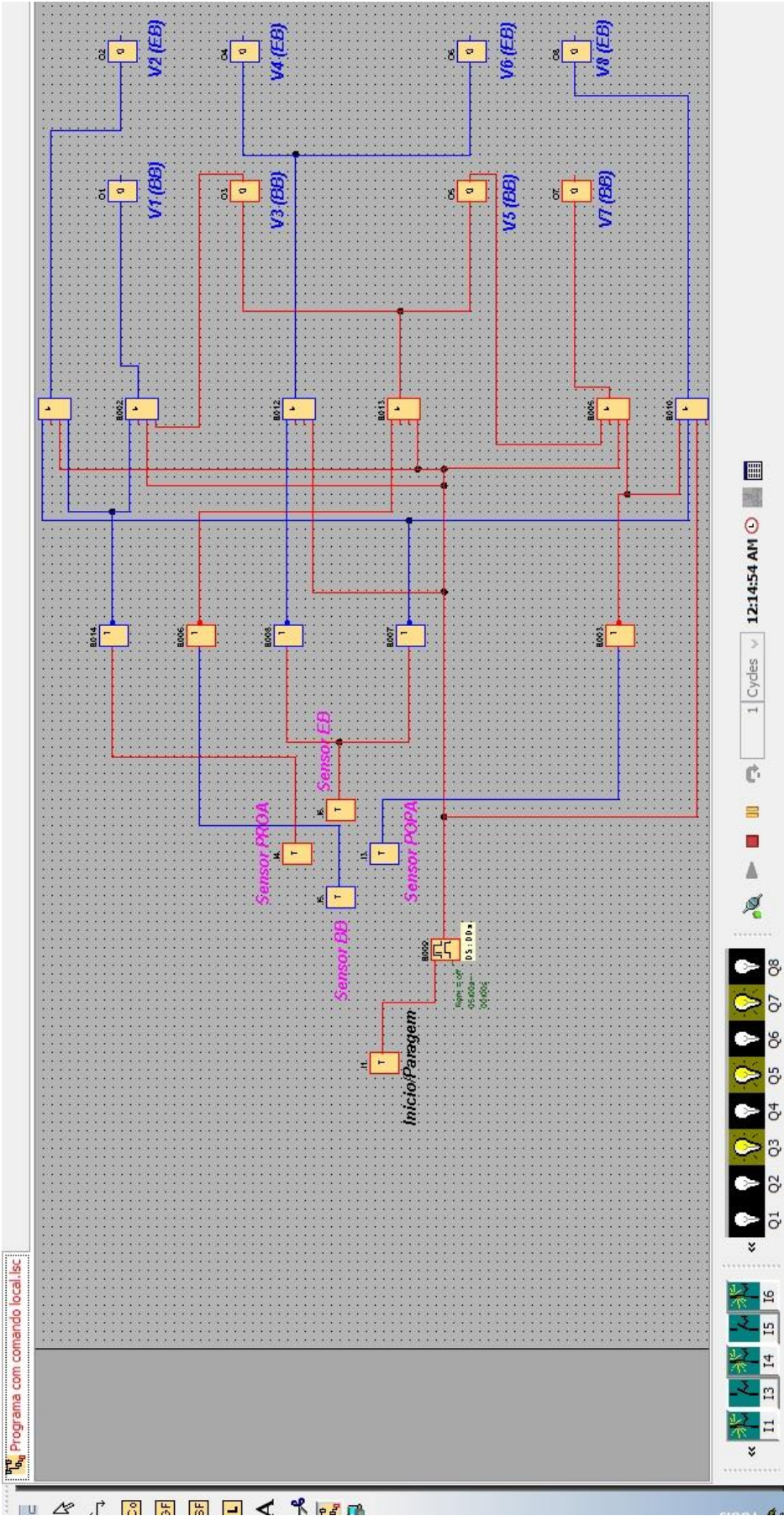


Esquema 6 – Resultado da atuação do sensor de Estibordo

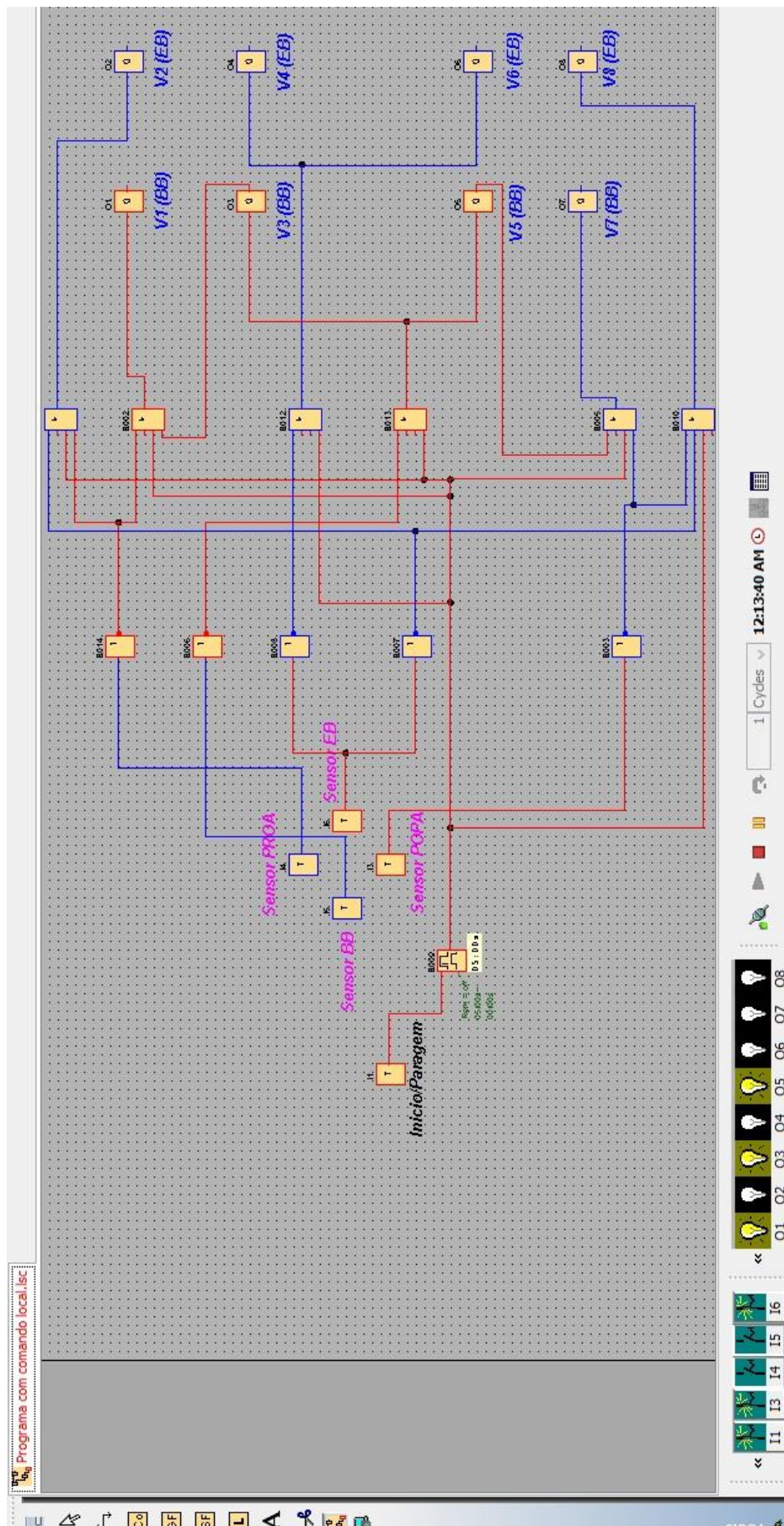




Esquema 8 - Resultado da atuação simultânea do sensor de popa e bombordo



Esquema 9 - Resultado da atuação simultânea do sensor de proa e estibordo



Esquema 10 - Resultado da atuação simultânea do sensor de popa e estibordo

ANEXO C (PROCESSO DE CONSTRUÇÃO DO MODELO)

Neste presente anexo, vou explicar da forma mais sucinta possível o processo de construção do modelo experimental, de modo a que qualquer consultor da minha dissertação fique ciente de todo o processo de construção. A construção começa na fase de projeto. Antes de começarmos a construir, temos de saber o que queremos da nossa construção, a especificidade do arranjo e alguns cálculos para formalizar o projeto. Como não podia deixar de ser aproveitando todo o ensinamento que nos vai sendo proporcionado ao longo do curso da EN. Elaborei um desenho num *software* de CAD, que é basicamente o desenho de uma estrutura ou objeto assistido por computador. Tem a enorme vantagem de observarmos exatamente o resultado final do desenho e, também, é possível executar inúmeras simulações, que este tipo de programa nos possibilita. Falo, por exemplo: resistência aos esforços mecânicos; condutibilidade elétrica; o seu peso, conjugando diferentes materiais. Uma infundável capacidade de simulação.

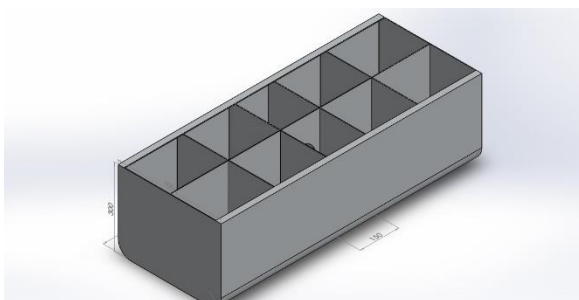
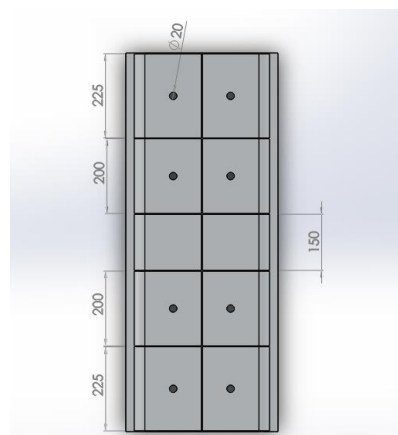


Imagem 1 – Desenho em CAD vista geral e topo



A orientação nesta área foi importante, devido ao facto de a minha mente, com a tendência natural derivada da minha juventude fazer um modelo demasiado ambicioso e complexo, com as formas aproximadas do navio. Posteriormente, e com o direcionamento dado, chegaria à conclusão que, no meu caso, foi uma boa escolha optar por um modelo de construção simples e que, primeiramente, executasse da forma mais simples e direta o que eu pretendia. Como viria a constatar, a forma do casco do modelo seria irrelevante, na medida em que o sistema, para o seu funcionamento eficaz, baseia-se somente na leitura de sensores. Ainda bem que assim foi, o que me poupou tempo na construção do modelo.

Depois de desenhado no computador o que pretendia, por uma boa sugestão alheia, construí um modelo á escala real em “*k line*”, que se aproxima muito do papel de maquete.

Isto, para ter uma ideia mais aproximada do que iria obter, aproveitei, também para montar alguns sistemas neste batelão de maquete, para fazer melhor a distribuição dos componentes.



Imagem 2 – Batelão construído em “k line” com alguns componentes montados para verificação

Batelão

O desenvolvimento do modelo definitivo começa pela construção do batelão. Nesta fase, recorri aos serviços do AA, SA. Depois de feita a compra da chapa, adquirida pelos serviços da EN, foi entregue na serralharia civil da divisão de mecânica do AA, SA. Aqui, neste local foi efetuada a soldadura do alumínio, de modo a que o cordão de soldadura¹⁵ mantivesse todos os compartimentos estanques. Portanto, o cordão teria de ser homogêneo e impermeável. No compartimento estanque, que geometricamente está no meio, foi colocado um suporte para a sustentação do autômato. Nos restantes compartimentos, foi efetuada uma furação de vinte milímetros, para a montagem das válvulas. O resultado final, depois de construído, é o que se pode observar na seguinte sequência de imagens.

¹⁵ Cordão de soldadura – é o depósito criado pela adição do elétrodo de forma a criar a linha de soldadura, esta linha tem este nome pela sua semelhança a um cordão.

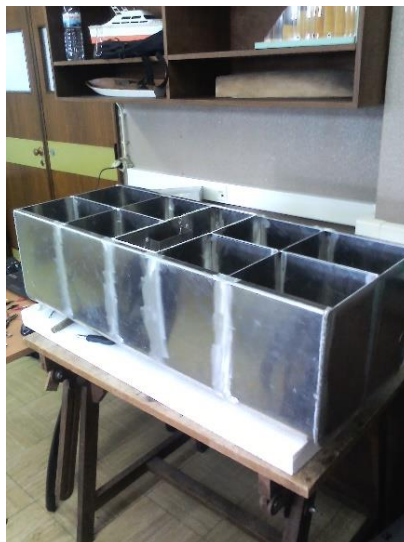


Imagem 3 – Batelão definitivo construído em alumínio pelo AA, SA.

Posso observar os pormenores de construção, tais como os furos para a colocação das válvulas, as soldaduras estanques, e o suporte para o automático. Tenho algum trabalho de montagem a fazer nesta fase, tal como a preparação para colocação de componentes, impermeabilização da parte seca, e montagem do circuito elétrico.

A parte seca, como é suposto, será estanque. Então, resolvi fazer a posterior lastragem da parte seca, para o afundamento completo do batelão. Procedi assim por uma questão de facilidade nas tarefas. Teria de colocar o batelão na água inúmeras vezes, para fazer alguns testes, tais como: a vedação e a fixação das válvulas; a linha de água que obtenho, sem nenhum componente ou lastro; verificação da impermeabilização das soldaduras entre compartimentos; teste de estanqueidade do compartimento estanque, com um afundamento provisório; entre outros. Ao longo da construção, tive essa necessidade. Se colocasse o lastro nesta fase, dificultar-me-ia sempre que quisesse colocar o batelão na água. Por isso, ficou para a fase de testes finais, e com o afundamento completo, com todos os equipamentos montados e testados. Embora a colocação do peso tenha ficado para o final, não deixei de testar se a parte seca garantia a flutuabilidade de todo o batelão. Na imagem número quatro, seguinte fiz um afundamento total provisório, abrindo todas as válvulas do modelo, e posso realmente constatar que o modelo flutua, devido à estanqueidade da parte seca.

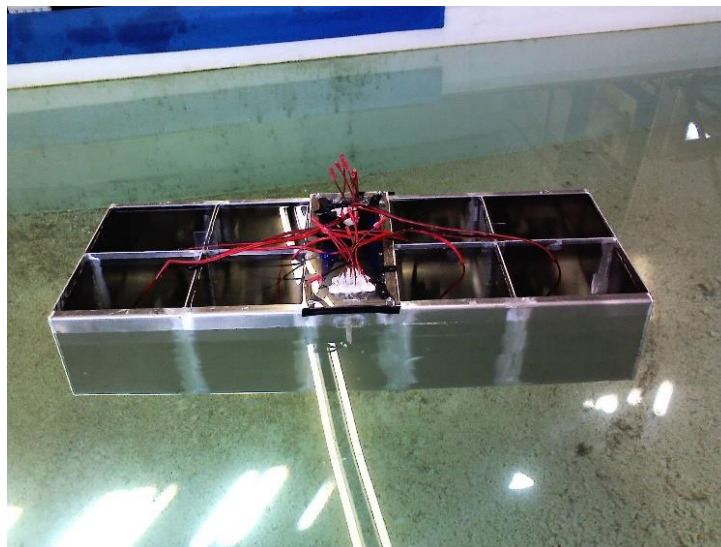


Imagem 4 – Teste de estanqueidade sem lastro equivalente ao volume do compartimento estanque.

Pude constatar dois factos neste teste. O primeiro é a confirmação da estanqueidade da parte seca. Assim, poderei colocar os equipamentos com mais segurança. O segundo é a confirmação efetiva que o peso dos componentes não totaliza o peso necessário que permite o batelão afundar. Daí ser necessário aplicar o restante peso em lastro.

Configuração do lastro

Para a lastragem do batelão, necessitaria de dezoito quilogramas, para a efetividade do afundamento. Com a colaboração preciosa da oficina da EN, forneceram me dois blocos de zinco, cada um deles com um peso aproximado de oito quilogramas. Estes blocos, como não tinham a medida certa, foi necessário executar uma maquinação, para possibilitar a colocação das placas no compartimento estanque. Então, começamos por limar os blocos de zinco na limadora, como está presente na imagem cinco. Este engenho faz um desbaste sucessivo da superfície, o que depois de executado reduz as suas dimensões. No meu caso, foi necessário retirar o total de meio centímetro de largura, com quatro passagens pela lâmina. O trabalho foi executado em aproximadamente vinte minutos.



Imagem 5 – Engenho de limar em funcionamento, vista geral e vista pormenorizada.

Depois da limagem, fiquei com duas placas de zinco, com a medida certa, para a colocação no batelão.



Imagem 6 – Placas de lastro colocadas e acamadas por poliestireno expandido (esferovite)

Passagem de cabos elétricos e impermeabilização de componentes

Nesta fase, a minha preocupação recai sobre a impermeabilização da parte seca do batelão, e de todos os componentes que possam estar sujeitos à água durante o ensaio. Primeiramente, terei de tapar a parte seca, o que ocorreu-me utilizar uma tampa de acrílico, por ser uma material barato e transparente. Posso, assim, fazer a observação da estanqueidade da tampa, e verificar também a correta passagem dos cabos. A tampa foi cortada à medida da parte seca do batelão, de modo simples, apenas com uma régua metálica e um riscador. Depois tive de fazer furos na tampa de acrílico, furos para passagem dos cabos das eletroválvulas, e quatro furos de fixação ao batelão. Para os cabos das válvulas, utilizei uma broca de 3.5 mm e, para a fixação, uma broca de 6 mm, porque corresponde ao diâmetro dos parafusos de fixação. Recorri ao engenho de furar da oficina da EN. A disposição dos furos na placa foi escolhida de modo aleatório. Para mim, achei esta configuração, em pirâmide, a mais lógica, para a posterior passagem e isolamento com vedante líquido

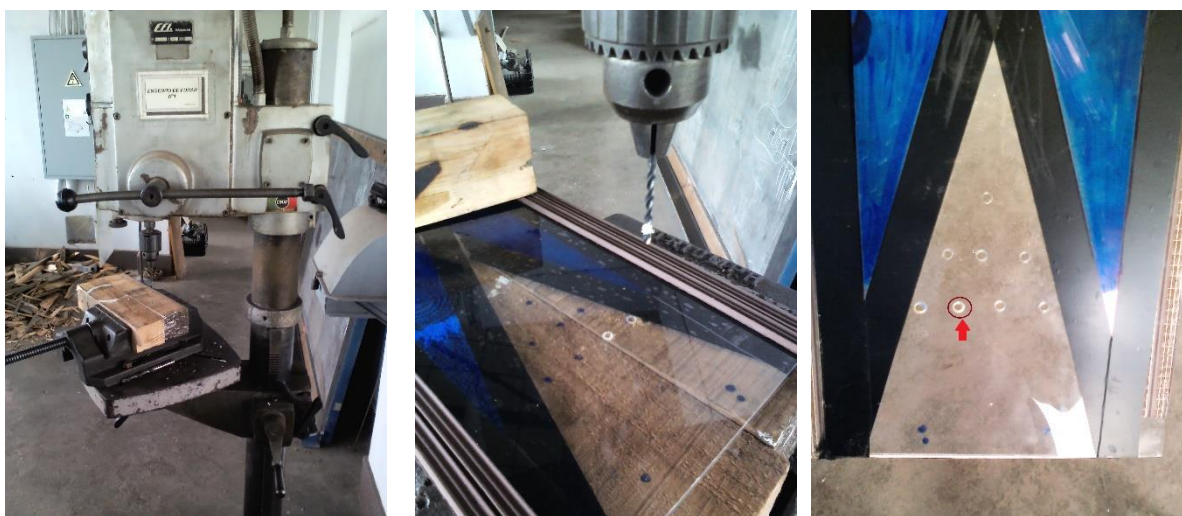


Imagem 7 – Engenho de furar da oficina da EN, furação em progresso, e resultado final

A furação na placa de acrílico teve de ser feita com o engenho de furar a alta rotação (1400 rpm). A furação no batelão, para a colocação dos parafusos de suporte, foi efetuada a baixa rotação (350 rpm). Estas características fazem parte da aprendizagem, que fui obtendo ao longo de toda a dissertação.

A furação de fixação da placa de acrílico foi efetuada com a broca de 6mm. Aqui também, tive naturalmente de fazer a furação no batelão:



Imagem 8 – Local a fazer a furação, furação em progresso, furação efetuada

Depois de todas as furações efetuadas, procedi à colocação dos parafusos de fixação do batelão, e coloquei vedante na zona dos parafusos, para que os furos ficassem completamente estanques, sendo o resultado final o seguinte:

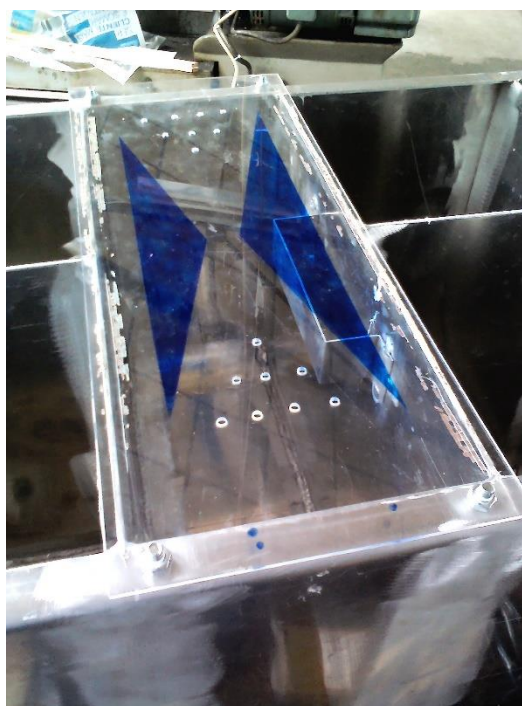


Imagem 9 – Resultado das furações de fixação depois de montado

Agora, para fazer a passagem completa dos cabos das eletroválvulas, tenho um conjunto de terminais elétricos para fazer estas ligações, do lado de fora. Isto é, o lado que

entra em contacto com a água tem um tipo de terminais que será mais fácil impermeabilizar. Do lado de dentro do compartimento, os cabos que irão dar às baterias e ao autómato, de um tipo de terminal mais simples, que são os terminais de língua. As passagens destes cabos deverão estar perfeitamente estanques. Por isso, nos furos, depois de colocados os fios, coloquei muito vedante. Se por ventura entrar água por esta via, poderão ocorrer danos sérios em todos os equipamentos eléctricos aqui presentes, como as baterias e o autómato, sendo este último o cérebro do sistema de afundamento. O resultado final da colocação dos cabos de ligação no interior o seguinte:

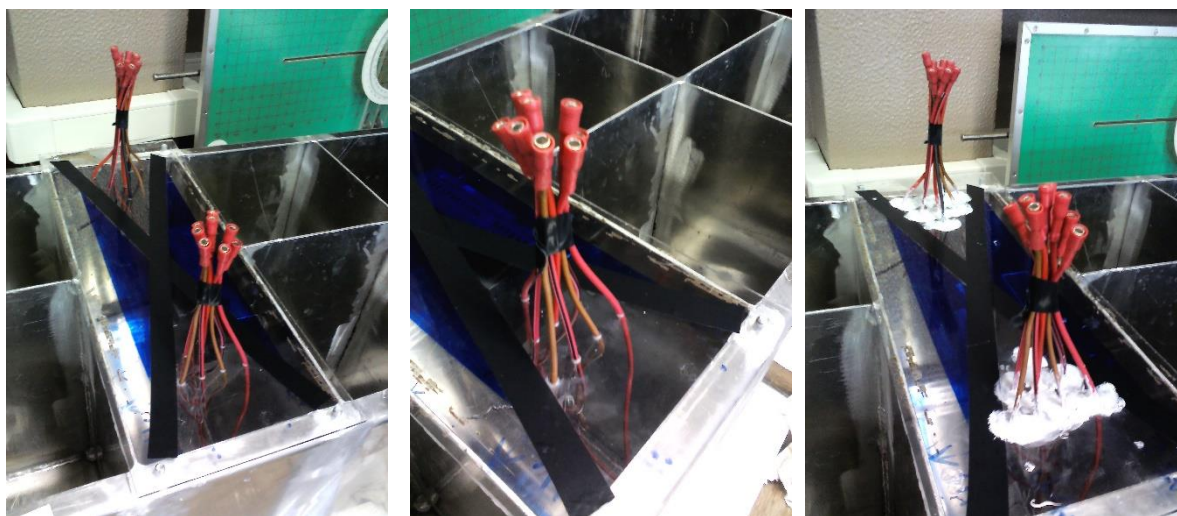


Imagem 10 – Cabos eléctricos depois de colocados, em pormenor, e depois de aplicado o vedante

Em relação à cablagem dos componentes, resolvi desrespeitar as cores que normalmente figuram o sentido negativo e positivo da corrente. Decidi, assim, por uma questão de logística. De cada vez que necessitava de mais cabo eléctrico mediante o fornecedor poderia vir com cores parecidas mas não exatamente iguais. O outro motivo prende-se com o facto de sobrar mais uma cor do que outra. Portanto, no meu entender, não faria sentido por uma questão de estética, colocar o sistema por um código de cores, o que pessoalmente preferia, mas ficava com muito excedente de fio de uma só cor. Exceção feita para a cablagem das eletroválvulas, que fiz questão em respeitar o código de cores. Resumindo, aqui, nem sempre o negativo/neutro tem a cor preta. Por sua vez, nem sempre o positivo tem a cor vermelha. O que se torna importante, é que o sistema se comporte como é pretendido.

Relativamente á impermeabilização de componentes, como a maioria destes encontra-se no compartimento estanque a minha preocupação recai em dois apenas. São estas as eletroválvulas e os sensores de inclinação. As eletroválvulas têm as bobinas naturalmente impermeáveis e estaques, porque estas são válvulas que estão dedicadas para o uso aquático. Então a sua impermeabilização será feita apenas nos terminais de ligação elétricos. Nesse local, optei por utilizar mangas termoretráteis., que executam uma impermeabilização perfeita.

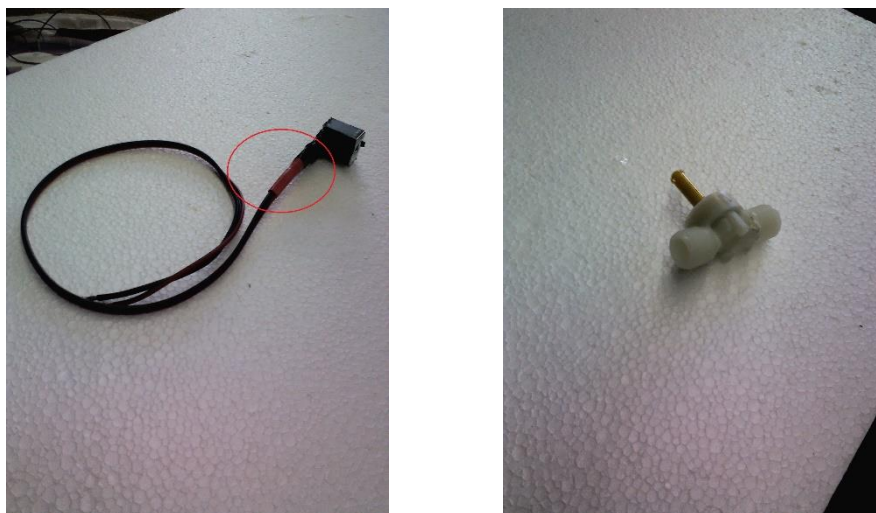


Imagem 11 – Bobina já impermeabilizada, e electroválvula, estes componentes operam em conjunto.

Os sensores de inclinação já requerem uma maior atenção. Estes sensores são exclusivamente elétricos e não estão preparados para serem utilizados em meios aquáticos. Portanto, o que fiz foi, depois de efetuadas as ligações elétricas nestes sensores, colocar fita isolante e, no final, vedante, para tapar todos os orifícios mais pequenos. Este vedante tem um grande poder penetrativo, o que é o ideal neste tipo de trabalhos. Os sensores ficaram com o seguinte aspeto:

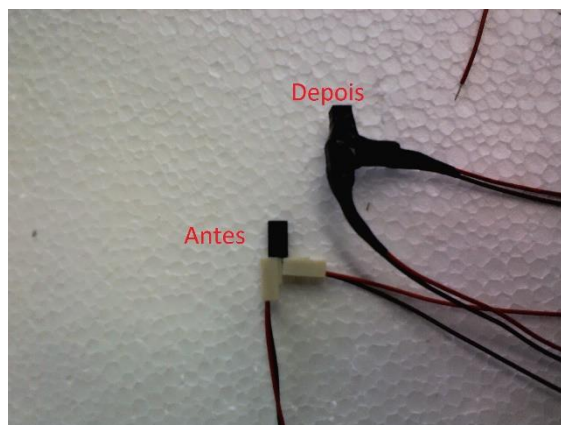


Imagem 12 – Sensor de inclinação, antes e depois da impermeabilização

Cablagem de componentes ao autómato

A cablagem de componentes exigiu um estudo prévio, pelos manuais do fabricante de alguns componentes, nomeadamente o autómato, que possui um esquema bastante criterioso, os sensores de ligação e as válvulas. Estes dois últimos componentes teriam de ser alimentados a partir da bateria, independentemente de estarem conectados ao autómato. Defini, desde o início da dissertação, que alimentaria o sistema somente com uma fonte, o que acarreta uma maior complexidade no esquema de ligações.

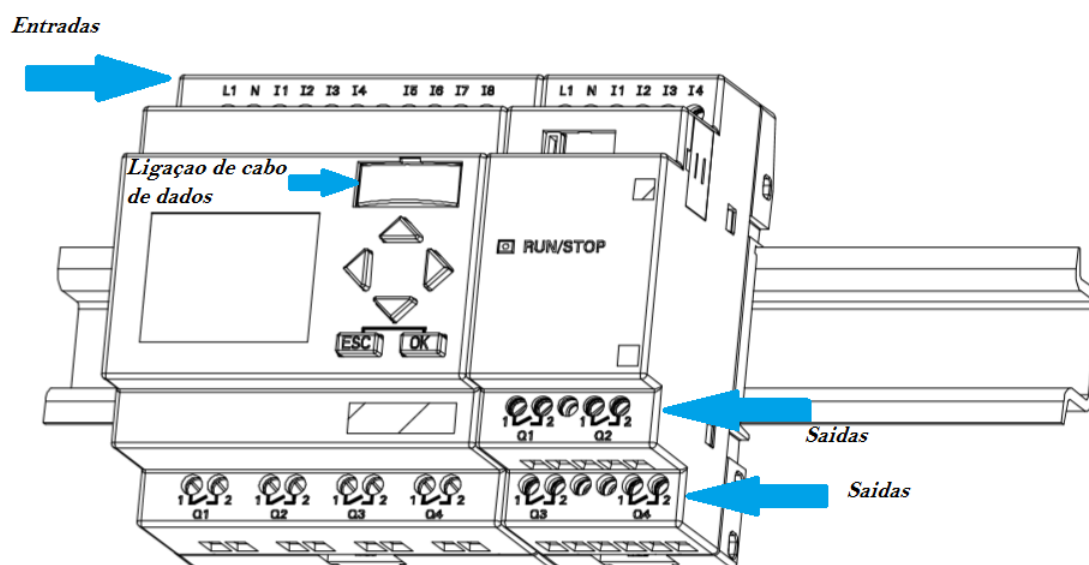


Imagem 13 – Autómato acoplado ao módulo (gravura) (SIEMENS, 2005)

A zona das entradas, onde está indicada com esta mesma designação, é a área onde se faz a conexão. Os cabos dos sensores e os cabos para a alimentação. O autómato vai do I1 até ao I8 e no módulo, para conexão de sensores, a designação é igual com base na imagem do autómato e do módulo, da esquerda para a direita temos:

- L1 – entrada para alimentação positiva (+) da bateria;
- N – entrada negativa (-), ou, no caso da corrente alternada o neutro;
- I1...I8 – entrada de sensores.

No módulo, aplica-se o mesmo esquema, com a diferença de, nas entradas dos sensores, ir de I1 a I4. Mas, quando o módulo encontra-se acoplado ao autómato principal,

internamente, o sistema dá seguimento à numeração. Ou seja, no módulo, onde é designado I1, passa a ser I9 e sucessivamente até ao I4, que corresponde a I12.

Nas saídas, que corresponde à zona inferior, existem duas conexões para cada saída, e temos:

- Q1...Q4 – saída para ligação das válvulas;
- No módulo de expansão (Q1...Q4) = (Q5...Q8), à semelhança do que acontece com as entradas, as ligações do módulo seguem a sequência do autómato principal, quando acoplado.

A conexão das entradas efetua-se, com base na imagem 14, da seguinte forma:

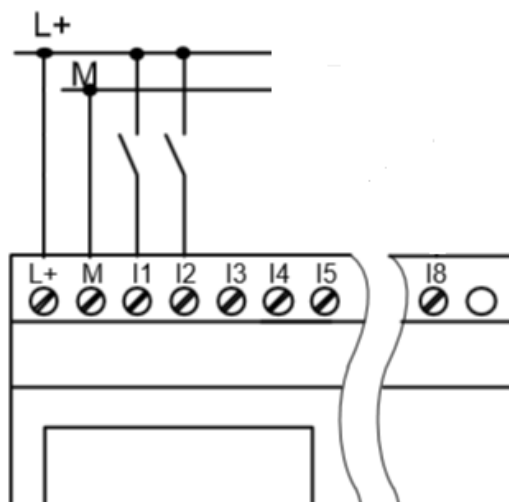


Imagem 14 – Esquema de ligação das entradas (SIEMENS, 2005)

É possível verificar que a ligação negativa é comum com o barramento das entradas. Ou seja, para fechar o circuito, só precisamos de conectar o sensor ao pólo positivo da bateria. O cabo negativo do sensor vai entrar no autómato, enquanto o cabo positivo vai ligar diretamente ao pólo (+) da bateria. O sensor vai atuar como um interruptor. Com este esquema, verificamos a importância da função tipo interruptor do sensor de inclinação.

O esquema de ligações para as saídas difere ligeiramente, e efetua-se do seguinte modo:

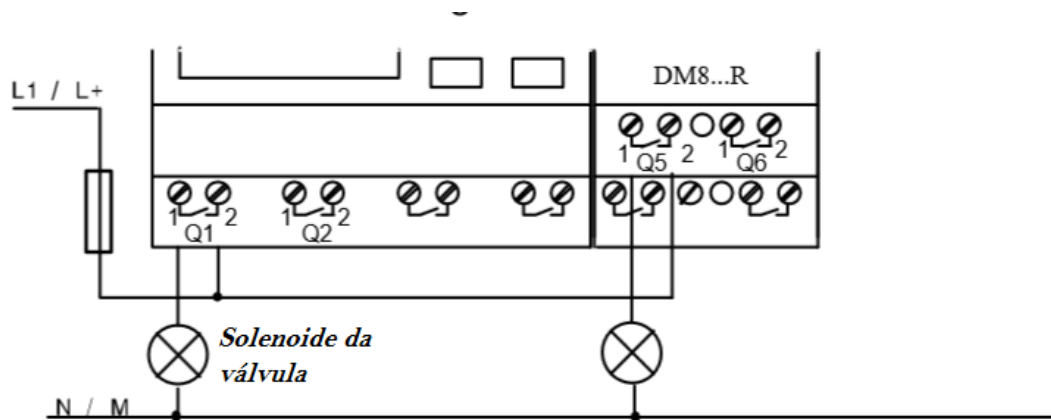


Imagem 15 – Esquema de ligação para as saídas (SIEMENS, 2005)

As saídas possuem duas vias, em que o nº2 de cada via é sempre o pólo positivo da bateria, e o nº1 de cada um dos Q's é a ligação do cabo negativo da válvula. O autómato, com a programação que contiver, é que faz a ativação do solenoide, com o fecho de Q, como representada na imagem quinze. A abertura deste relé desativa a válvula. O método do interruptor é gerido pela programação.

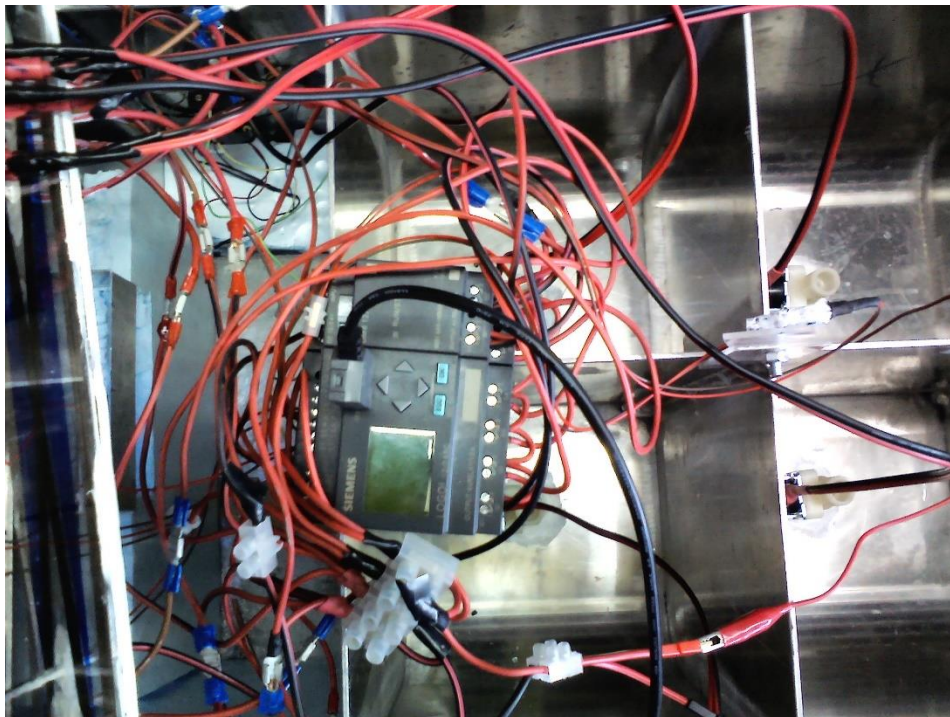


Imagem 16 – Esquema de ligação real do autómato

Fixação estrutural dos componentes

Eletroválvulas

As eletroválvulas são componentes que, neste modelo, estão sujeitos a esforços consideráveis, tais como: a pressão hidrostática durante o afundamento; o peso do batelão; quando está simplesmente apoiado numa superfície; tensões de tração eventuais, que os cabos de ligação das válvulas podem efetuar; etc. Devido a estas causas, as eletroválvulas teriam de estar fortemente fixas à estrutura do batelão e com um nível de impermeabilização razoável, de modo a que possíveis passagens de água, em locais que não fossem o interior da válvula, não aconteçam.

As eletroválvulas foram fixas com porcas, já que eram roscadas, e vedadas com borracha e vedante líquido. Assim, garantia a perfeita fixação e vedação.

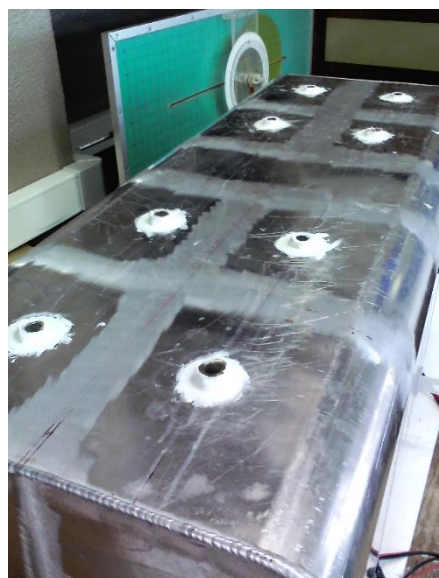


Imagem 17 – Fixação das eletroválvulas, pormenor e vista geral

Para finalizar, executei um teste no tanque, para verificar a estanqueidade das válvulas e a resistência à água.



Imagem 18 – Execução do primeiro teste de estanqueidade às válvulas

Sensores de inclinação

Como e em que posição iria colocar os sensores, foram dúvidas que persistiram na minha cabeça. Os sensores são os olhos do sistema e, se estiverem montados de forma incorreta, todo o sistema funcionará de forma incorreta, o que deitaria por terra todo o esforço de construir um modelo de ensaio. Inicialmente, a minha ideia consistia em colocar os sensores no interior do compartimento estanque, porque assim, no meu entender, poupava o facto de ter de impermeabilizar os sensores, pois não entravam em contacto com a água. Ora, como enorme desvantagem, possivelmente, irá retirar sensibilidade de deteção de movimentos do sensor, por estarem próximos do centro geométrico do batelão. O ideal é, sem dúvida, colocar estes sensores nas periferias do batelão. Assim o fiz.

Fixei suportes de acrílico na localização em que os sensores iriam ficar e impermeabilizei-os, como já referi na explicação anterior. Então, para a deteção de

movimentos no plano transversal e longitudinal, os pontos de fixação ficaram com o seguinte aspeto:



Imagem 19 – Fixação transversal, e fixações longitudinais

Fiz suportes com furos para os sensores de inclinação, de modo a que fosse possível regular a sensibilidade do sensor. O sensor montado na horizontal tem as condições, por defeito, de a esfera fechar o circuito aos dez graus de inclinação, o que já está fora do alcance da teoria metacêntrica. O meu objetivo no processo de afundamento é que o batelão faça a sua entrada final na água com o menor ângulo possível de inclinação. Posso obtê-lo com a inclinação dos sensores, de modo a que execute correções para inclinações na casa dos dois a três graus. Calibrei os sensores com a inclinação dos suportes, como é visível nas imagens seguintes, de modo a que atingisse um nível de precisão maior. Em contrapartida, o sistema trabalha as válvulas a uma frequência maior. Consequentemente, traduz-se num maior gasto de energia.

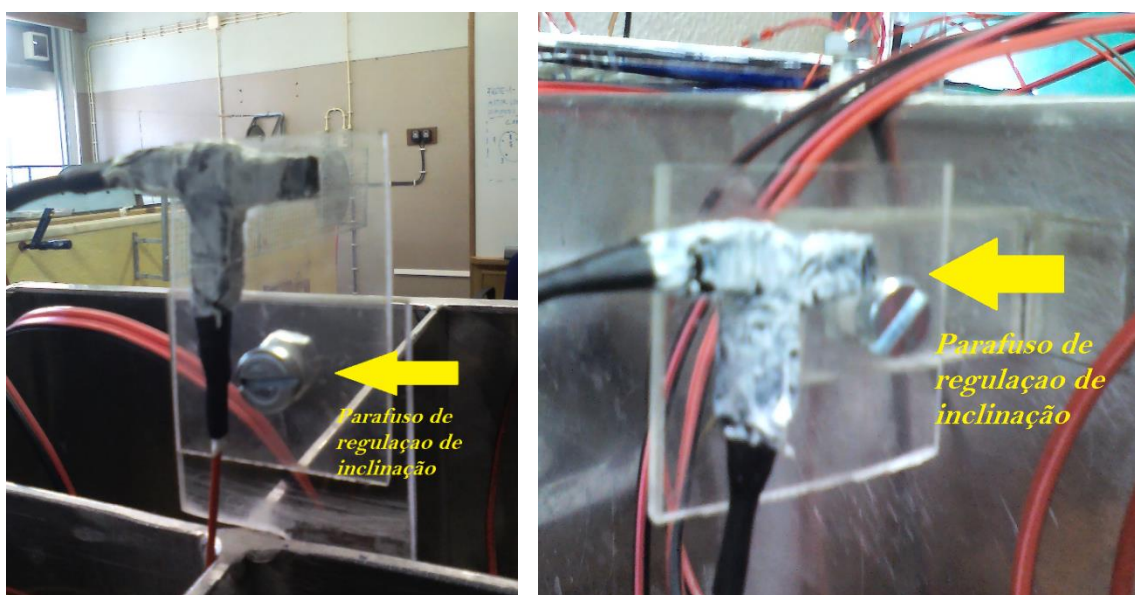


Imagem 20 – Regulações de sensores longitudinais e transversais



Esta página encontra-se intencionalmente em branco